

ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ

ЗАОЧНЕ ВІДДІЛЕННЯ

КАФЕДРА “ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА”

До захисту допущено
завідувач кафедру

І. В. Нездвецька

“ _____ ” _____ 2026 року

Пояснювальна записка

до бакалаврської роботи

освітнього ступеня “бакалавр”

спеціальність 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
на тему: “Розробка системи мікрогенерації для житлового будинку на базі
аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан»”

Виконав: студент IV курсу, групи БЕЗ-4стн

спеціальності

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

_____ Олександр ПОВАР

Керівник роботи _____ Богдан АНТИПЧУК

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

м. Житомир – 2026 року

ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ

Заочне відділення
Кафедра “Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка”
галузь знань 14 “Електрична інженерія”
спеціальність 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
освітній ступінь: бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри

І. В. Нездвєцька
“ _____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Повара Олександра Петровича

1. Тема дипломної роботи: “ Розробка системи мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан» ”, керівник роботи Антипчук Богдан Олександрович, затверджені наказом навчального закладу від “ ____ ” _____ 20__ року № ____.
2. Строк подання студентом проекту “ ____ ” _____ 2026 року
3. Вихідні дані до роботи: конструктивні особливості даху приватного будинку (м. Житомир, Житомирська область, Україна) та енергетичний профіль його побутового обладнання для оцінки сумарного навантаження.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - Вступ;
 - 1. Аналітичний огляд літературних джерел за тематикою роботи;
 - 2. Система мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан»;
 - 3. Техніко-економічний аналіз;
 - 4. Заходи з охорони праці та техніки безпеки;
 - Висновки.
5. Перелік візуального та графічного матеріалу:
 1. Схема електрична структурна. Система мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан».

2. Схема електрична принципова. Система мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан».

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	
Розділ 1	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	
Розділ 2	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	
Розділ 3	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	
Розділ 4	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	
Висновки	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	
ГЧ та технічна документація	Сазонов А.Ю. – викладач спеціальних дисциплін	“__” ____ 2026р.	

7. Дата видачі завдання “__” ____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Вступ.	“__” ____ 2026р.	
2.	Розділ 1.	“__” ____ 2026р.	
3.	Розділ 2.	“__” ____ 2026р.	
4.	Розділ 3.	“__” ____ 2026р.	
5.	Розділ 4.	“__” ____ 2026р.	
8.	Висновки	“__” ____ 2026р.	
9.	Графічна частина та технічна документація	“__” ____ 2026р.	

Студент _____ Олександр ПОВАР

Керівник роботи _____ Богдан АНТИПЧУК

“ Розробка системи мікрогенерації для житлового будинку на базі
аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан» ”

РЕФЕРАТ

Бакалаврська дипломна робота складається з 72 листів пояснювальної записки, яка включає чотири розділи та графічну частину виконану на 2 листах формату А1 креслярського паперу.

У першому розділі проаналізовано світові та вітчизняні тренди вітроенергетики, що дозволило обґрунтувати вибір турбіни типу «тюльпан» для міської забудови. Досліджено її ключові переваги: ефективну роботу з турбулентними потоками, низький поріг запуску та аеродинамічну специфіку вертикально-осьової конструкції.

У другому розділі розроблено комплексну систему мікрогенерації для житлового будинку, базуючись на розрахунках енергоспоживання об'єкта та вітроенергетичного потенціалу обраної локації. Проведено аеродинамічну оптимізацію моделі «тюльпан», що дозволило вибрати найбільш ефективну конфігурацію турбіни. Виконано інженерний підбір та розрахунок параметрів силового обладнання: інвертора, акумуляторних батарей та системи автоматичного керування (ABP), що забезпечує стабільну роботу системи в автономному та мережевому режимах.

У третьому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування проєкту. Розраховано капітальні та експлуатаційні витрати, а також визначено термін окупності системи.

У четвертому розділі розроблено комплекс заходів із безпечної експлуатації системи. Визначено правила монтажу та обслуговування турбін «тюльпан», а також встановлено вимоги до пожежної безпеки та електрозахисту обладнання в умовах житлового будинку.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМАТИКОЮ РОБОТИ	10
1.1 Ретроспективний аналіз та поточні тенденції глобальної вітроенергетики	10
1.2. Специфіка та стратегічні вектори розвитку вітчизняного вітроенергетичного сектору	12
1.3. Порівняльний аналіз конструкційних схем вітроустановок	14
1.4 Аеродинамічні особливості та принцип роботи вітротурбіни «тюльпан»	17
2 СИСТЕМА МІКРОГЕНЕРАЦІЇ ДЛЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ НА БАЗІ АЕРОДИНАМІЧНО-ЕФЕКТИВНИХ ВІТРОТУРБІН ТИПУ «ТЮЛЬПАН»	20
2.1 Початкові параметри для розробки системи	20
2.2 Фундаментальні основи проектування та конфігурації вітроенергетичних установок	22
2.3 Визначення середнього показника енергоспоживання електричного обладнання житлового будинку	24
2.4 Оцінка вітроенергетичного потенціалу району локації вітроелектричної установки	27
2.5 Розрахунок аеродинамічних показників та оптимізація вибору моделі вітроустановки «тюльпан»	29
2.6 Обґрунтування вибору та розрахунок параметрів інвертора	44
2.7 Розрахунок параметрів та обґрунтування вибору акумуляторних батарей	49
2.8 Вибір комутаційного обладнання для автоматичного перемикання джерел живлення	53
2.9 Техніко-економічне обґрунтування вибору засобу обліку електроенергії	54
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ	57
3.1 Аналіз капітальних витрат на впровадження розробленої системи	57

	7
3.2 Оцінка витрат на обслуговування та експлуатацію розробленої системи	60
3.3 Визначення періоду окупності розробленої системи	62
4 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	65
4.1 Організація безпечного виконання робіт під час встановлення та обслуговування вітрогенераторів типу «тюльпан»	65
4.2 Організація протипожежної безпеки при експлуатації вітрогенераторів типу «тюльпан»	66
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕ	69
ДОДАТКИ	71

ВСТУП

Сучасний етап розвитку цивілізації характеризується домінуванням електричної енергії як ключового ресурсу в усіх сферах людської діяльності. Завдяки своїй універсальності та високому ККД при перетворенні, попит на неї демонструє стабільне щорічне зростання. Водночас вичерпність традиційних викопних паливних ресурсів та екологічні виклики змушують людство переглядати підходи до енергозабезпечення. У цьому контексті перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячної, геотермальної та вітрової, стає не просто альтернативою, а стратегічною необхідністю.

Вітроенергетика посідає особливе місце серед методів генерації завдяки своїй екологічній чистоті, автономності та невичерпності ресурсу. Проте інтеграція вітрогенераторів у житловий сектор стикається з низкою технічних перепон: нестабільністю повітряних потоків, високою вартістю обладнання та необхідністю використання дороговартісних систем акумулювання енергії.

Дана дипломна робота присвячена розробці системи мікрогенерації для житлового будинку, що базується на використанні віротурбін типу «тюльпан». Вибір саме такої конструкції зумовлений її аеродинамічною ефективністю: на відміну від класичних горизонтальних аналогів, турбіни «тюльпан» краще адаптовані до турбулентних потоків у межах забудови та мають вищі показники продуктивності при низьких швидкостях вітру.

Важливим чинником актуальності роботи є поточна енергетична ситуація в Україні. Підвищення тарифів на електроенергію для населення до рівня 4,32 грн./кВт·год. значно скорочує термін окупності приватних енергосистем. Окрім того, законодавча база України, зокрема положення про «зелений тариф», створює сприятливі умови для власників домогосподарств:

- можливість експлуатації установок потужністю до 30 кВт без отримання ліцензій;

- фіксація викупної ціни енергії в іноземній валюті (євро), що захищає інвестиції від інфляційних ризиків.

Метою дослідження в даній роботі є проєктування високоефективної системи мікрогенерації, яка дозволить мінімізувати недоліки природної нестабільності вітру шляхом впровадження оптимальних технічних рішень. Використання інноваційної геометрії турбін «тюльпан» у поєднанні з сучасними засобами управління енергопотоками дозволить створити конкурентоспроможну та економічно виправдану систему автономного енергозабезпечення для приватного житлового сектору.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМАТИКОЮ РОБОТИ

1.1. Ретроспективний аналіз та поточні тенденції глобальної вітроенергетики

На сучасному етапі трансформації світового енергосектору вітроенергетика перейшла зі статусу допоміжної галузі до ролі одного з базових елементів глобальної енергетичної безпеки. У період 2025-2026 років спостерігається інтенсифікація зростання потужностей, що зумовлено жорсткими екологічними стандартами та необхідністю диверсифікації енергоресурсів на національних рівнях.

Глобальна динаміка та ринкові показники. Спираючись на аналітичні звіти Глобальної вітроенергетичної ради (GWEC), можна констатувати, що сукупна потужність світових вітрових активів подолати поріг у 1,3 ТВт. Наразі вітрова генерація забезпечує приблизно 12% загальносвітового електроспоживання. Попри збереження лідерських позицій Китаєм, США та провідними країнами ЄС (Німеччина, Данія), фіксується активна експансія технологій на ринки держав, що розвиваються.

Пріоритетні технологічні вектори 2026 року:

- збільшення одиничної потужності та офшорне будівництво: триває тенденція до укрупнення агрегатів (сучасні наземні турбіни досягли номінальної потужності 6-8 МВт, тоді як офшорні установки перевищують показник у 15 МВт, що дозволяє суттєво оптимізувати площі забудови);
- системна інтеграція та гібридизація: актуальні проекти все частіше реалізуються у форматі гібридних комплексів, що об'єднують вітрові та фотоелектричні станції з промисловими системами накопичення енергії (BESS), така конфігурація дозволяє стабілізувати видачу енергії та мінімізувати вплив стохастичності вітрового потоку;

- інтелектуальне керування та цифровізація: використання алгоритмів штучного інтелекту для предиктивного обслуговування та динамічного регулювання кута атаки лопатей дозволяє максимізувати коефіцієнт потужності вітротурбіни у реальному часі;
- розбудова розподіленої мікрогенерації: важливим напрямком стало впровадження малогабаритних установок (30-50 кВт), попит на такі рішення диктується потребою приватних домогосподарств в енергонезалежності, а розвиток вертикально-осьових турбін забезпечує їх стабільну роботу навіть у складних аеродинамічних умовах міської забудови.

Інновації у сфері матеріалознавства та автоматизація промислових ліній забезпечили сталу тенденцію до скорочення нормованої вартості енергії. Станом на 2026 рік вітрові електростанції в більшості кліматичних зон досягли паритету або навіть переваги за вартістю генерації порівняно з ТЕС, що працюють на викопному паливі. Це сформувало сприятливий інвестиційний клімат, дозволяючи галузі розвиватися на ринкових засадах за рахунок приватних активів, мінімізуючи залежність від прямих державних дотацій.

Резюмуючи вищевикладене, слід зазначити, що глобальна вітроенергетична галузь досягла стадії технологічної стабілізації. На цьому етапі стратегічний вектор змістився з простого збільшення валової потужності до впровадження інтелектуальних систем керування та підвищення стійкості обладнання до нестабільних погодних умов. Застосування методів предиктивної аналітики та машинного навчання сьогодні є обов'язковою умовою досягнення максимальної ефективності вітроустановок.

У контексті даної трансформації, проєктування локальних мікроенергетичних вузлів для урбанізованого середовища є логічним продовженням еволюції енергосистем. Така тенденція повністю інтегрується у світову стратегію децентралізації та сприяє масовому становленню класу

просьюмерів (prosumers). Використання інноваційних рішень, таких як вертикально-осьові турбіни типу «тюльпан», дозволяє ефективно реалізувати потенціал енергогенерації безпосередньо в точках споживання. Це не лише мінімізує технічні втрати в магістральних мережах, а й формує архітектуру «розумних міст» (Smart Cities), де кожна автономна одиниця житлового фонду виступає гарантом стабільності та живучості всієї національної енергетичної інфраструктури.

1.2. Специфіка та стратегічні вектори розвитку вітчизняного вітроенергетичного сектору

У поточному контексті української економіки вітроенергетика переросла межі суто екологічної ініціативи, ставши невід'ємною складовою стратегії національної енергетичної безпеки. Протягом 2025-2026 років в Україні відбулася радикальна трансформація підходів до енергозабезпечення: основний фокус змістився з експлуатації великих централізованих вітропарків у бік розгортання розподіленої (децентралізованої) генерації.

Сучасний стан українського енергосектору визначається комплексом чинників, що стимулюють перехід до моделі розподіленої генерації. Першочерговим пріоритетом розвитку є децентралізація та зміцнення енергетичної суверенності держави. Оновлена концепція енергосистеми передбачає трансформацію ієрархічної моделі в мережеву структуру, яка базується на множині локальних джерел енергії. Такий підхід радикально знижує ризики каскадних відмов системи при пошкодженні магістральних ліній. У цьому контексті малі вітроенергетичні установки, зокрема типу «тюльпан», виступають оптимальним технічним інструментом для забезпечення автономності як об'єктів критичної інфраструктури, так і приватних домогосподарств.

Цей процес підкріплюється позитивними змінами у нормативно-правовому регулюванні. Завдяки активному сприянню Української

вітроенергетичної асоціації (УВЕА), станом на 2026 рік впроваджено дієві стимулюючі механізми: від спрощеного режиму ввезення високотехнологічних компонентів (генераторів та інтелектуальних інверторів) до повної цифровізації протоколів приєднання мікроустановок до загальної мережі.

Паралельно з нормативною базою зміцнюється і фінансово-економічне обґрунтування впровадження ВЕС. Корекція тарифної політики у синергії з дефіцитом потужностей суттєво скоротили термін окупності проєктів. Впровадження моделі Net Billing дозволило перетворити кінцевого споживача на активного просьюмера, який може ефективно оперувати надлишками генерованої енергії, конвертуючи їх у фінансовий депозит для покриття майбутнього споживання.

Попри складні умови експлуатації, виробничий потенціал галузі демонструє стійкість: станом на початок 2026 року сумарна встановлена потужність ВЕС в Україні стабілізувалася на рівні 1,95 ГВт. Важливою особливістю стало розширення географії розвитку: мікрогенерація активно виходить за межі традиційно-вітряних південних степів, охоплюючи центральні та західні регіони. У цих областях локальні особливості рельєфу та специфіка ландшафту створюють сприятливі аеродинамічні коридори, що робить використання компактних вертикально-осьових турбін не лише екологічно виправданим, а й технічно ефективним рішенням.

Однак, результати оцінки експлуатаційних параметрів свідчать, що традиційні вітрогенератори горизонтального типу мають низку критичних недоліків, які обмежують їх застосування в урбанізованому просторі, зокрема через інтенсивне акустичне випромінювання та передачу механічних вібрацій на опорні конструкції. Така ситуація стимулює попит на інноваційні вертикально-осьові системи. Вітротурбіна «тюльпан», завдяки мінімальному рівню шуму та підвищеній експлуатаційній безпеці, виступає найоптимальнішим рішенням для споживачів, що мають на меті досягнення.

енергонезалежності за умови збереження комфортного життєвого середовища

1.3. Порівняльний аналіз конструкційних схем вітроустановок

Продуктивність трансформації кінетичної енергії повітряних мас у електричну безпосередньо зумовлена специфікою архітектури ротора та просторовою орієнтацією вала генератора. Сучасна класифікація вітроенергетичних установок базується на виокремленні двох ключових конструкційних схем: горизонтально-осьових (HAWT) та вертикально-осьових (VAWT) систем.

Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки (див. рисунок 1.1) є домінуючим конструктивним типом у секторі промислової вітроенергетики великої потужності.

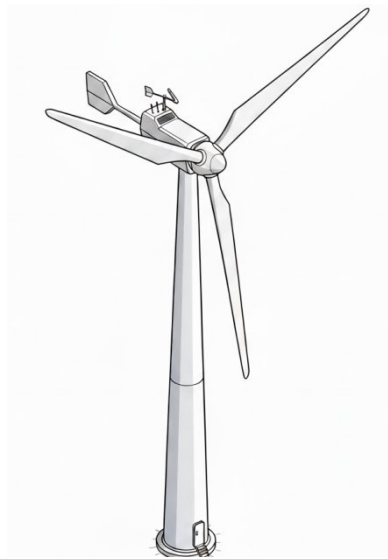


Рисунок 1.1 – Горизонтально-осьова вітроенергетична установка

Функціонування горизонтально-осьових вітротурбін базується на перетворенні енергії повітряного потоку за допомогою підйомної сили, що виникає на лопатях з аеродинамічним профілем. Головними перевагами таких систем є високі показники енергоефективності, де коефіцієнт

використання потужності вітру C_p досягає значень 0,45-0,5, а також можливість розміщення ротора на великій висоті для взаємодії зі стабільними ламінарними потоками. Водночас застосування таких установок у сфері мікрогенерації обмежене низкою експлуатаційних чинників: необхідністю впровадження складних механізмів орієнтації на вітер (флюгування), різким зниженням ККД в умовах характерної для міст турбулентності, а також генерацією низькочастотних шумів і вібраційних навантажень на опору, що створює дискомфорт у межах житлової забудови.

На рисунку 1.2 зображено вертикально-осьові вітроенергетичні установки (VAWT). До цієї категорії належать системи, вісь обертання яких розташована перпендикулярно до вектору вітрового потоку (ротори Савоніуса, Дар'є, а також гібридні конструкції, прикладом яких є турбіна «тюльпан»).



Рисунок 1.2 – Вертикально-осьова вітроенергетична установка

Ключовою особливістю вертикально-осьових установок є їхня всеспрямованість – унікальна конструктивна здатність ефективно функціонувати при будь-якому напрямку вітру. Це позбавляє систему потреби у складних сервоприводах або механічних пристроях орієнтації на потік, що значно підвищує загальну надійність механізму. Завдяки низькому інерційному порогу, такі моделі демонструють мінімальну стартову

швидкість, розпочинаючи генерацію енергії вже при 1,5-2,0 м/с, що є критично важливим для стабільної роботи в умовах мінливих повітряних потоків.

Високий рівень ергономічності та сервісопридатності вертикально-осьових установок забезпечується специфічним компонуванням: розміщення генераторного вузла та електронних блоків керування безпосередньо в основі щогли суттєво спрощує проведення регламентних і ремонтних робіт, мінімізуючи витрати на обслуговування. Окрім технічних переваг, установки відповідають суворим вимогам екологічної та експлуатаційної безпеки.

Завдяки помірній кутовій швидкості обертання та компактному радіусу лопатей, ротори залишаються візуально помітними, що практично нівелює ризики для фауни та знижує динамічні навантаження на опорні конструкції, забезпечуючи тривалий термін експлуатації.

Для обґрунтування вибору турбіни типу «тюльпан» (яка є вдосконаленим варіантом вертикального ротора з гнучкою геометрією лопатей) нижче, в таблиці 1.1, наведено порівняльну характеристику ключових параметрів горизонтально-осьових та вертикально-осьових вітроенергетичних установок.

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика конструкцій вітроенергетичних установок

Параметр порівняння	Горизонтальні (HAWT)	Вертикальні (VAWT / «тюльпан»)
Коефіцієнт C_p	Високий (до 0,5)	Середній (0,25-0,35)
Реакція на зміну вітру	Повільна (потрібен поворот)	Миттєва (всеспрямованість)
Рівень шуму	Високий (60–80 дБ)	Низький (< 35-40 дБ)
Робота в турбулентному потоці	Малоефективна	Високоєфективна
Висота щогли	Велика (потрібно «чистий» вітер)	Може бути мінімальною
Вібраційне навантаження	Значне (небезпечно для дахів)	Мінімальне

Отже, незважаючи на високу теоретичну ефективність горизонтальних турбін у ламінарних потоках, у контексті децентралізованої генерації – зокрема в умовах міської забудови та складного ландшафту – пріоритет зміщується в бік вертикально-осьових установок. Модель «тюльпан» виступає взірцем аеродинамічної адаптації: завдяки поєднанню акустичного комфорту, експлуатаційної безпеки та здатності ефективно перетворювати енергію турбулентних вихорів, ця система стає найраціональнішим технічним рішенням для просьюмерів.

1.4 Аеродинамічні особливості та принцип роботи вітротурбіни «тюльпан»

Вітроенергетична установка вертикально-осьового типу «тюльпан» (див. рис. 1.3) характеризується циліндричною архітектурою з просторово вигнутими лопатями-пелюстками. Така геометрична конфігурація забезпечує повну всеспрямованість, дозволяючи ефективно генерувати потужність при мінімальних повітряних потоках незалежно від вектора вітру. Окрім того, аеродинамічна форма лопатей мінімізує акустичне забруднення та гасить динамічні вібрації в процесі експлуатації.

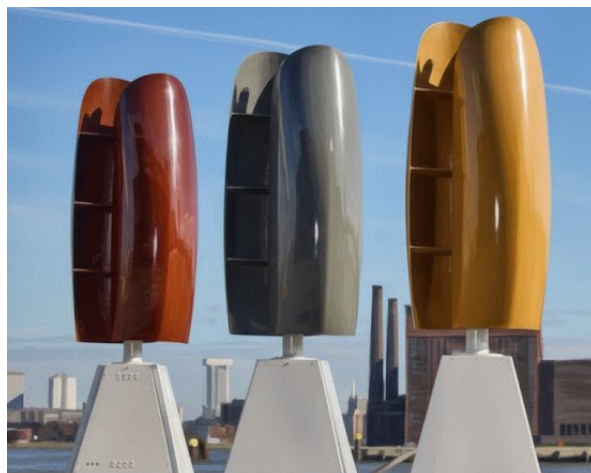


Рисунок 1.3 – Вітроенергетична установка вертикально-осьового типу «тюльпан»

Принцип дії вітротурбіни «тюльпан» ґрунтується на синергії двох фундаментальних аеродинамічних принципів: використання сили опору та підйомної сили. На етапі пуску та при слабкому вітрі (1,5-3 м/с) установка працює за принципом ротора Савоніуса, де тиск повітряного потоку на внутрішні увігнуті поверхні «пелюсток» забезпечує високий стартовий момент. З нарощуванням обертів та зростанням кутової швидкості в роботу вступає аеродинамічний профіль лопатей, що починає генерувати підйомну силу, характерну для роторів Дар'є. Такий перехід дозволяє системі вийти на режим, за якого лінійна швидкість кромки лопаті випереджає швидкість вітру, що суттєво оптимізує коефіцієнт корисної дії та загальну енергоефективність турбіни.

Геометрична конфігурація лопатей вітрогенератора «тюльпан» спроектована як комплексна відповідь на виклики нестабільного міського вітрового фону. Завдяки використанню подвійної кривини пелюсток зі змінним радіусом, системі вдається стабілізувати повітряний потік і мінімізувати зону аеродинамічної тіні, що гарантує плавний хід ротора без деструктивних пульсацій крутного моменту.

Особлива архітектура з вертикальним звуженням основи та розширенням верхньої частини реалізує механізм саморегуляції потоку: утворюючи внутрішній керований вихор, ротор додатково залучає навколишні повітряні маси, фактично збільшуючи ефективну площу захоплення вітрового потоку. Цей ефект доповнюється конструктивним «провітрюванням», яке завдяки підтримці оптимального кута атаки в широкому діапазоні швидкостей мінімізує лобовий опір лопаті під час її руху назустріч вітру, що суттєво підвищує загальну продуктивність установки.

На відміну від горизонтальних вітрогенераторів, «тюльпан» оптимізований для експлуатації в зонах високої турбулентності завдяки таким характеристикам:

- миттєва всеспрямованість: турбіна не потребує часу на позиціонування за вітром, що зберігає інерцію та обертовий момент при різких змінах його напрямку;
- адаптація потоку: пелюсткоподібні лопаті здатні "вирівнювати" турбулентні вихори, перетворюючи їх на корисну роботу, що робить установку ідеальним рішенням для монтажу на дахах будівель.

Аеродинамічна концепція ротора «тюльпан» дозволяє уникнути формування високочастотних кінцевих вихорів, які є головним джерелом специфічного шуму (свисту) у традиційних лопатевих вітрогенераторів. Завдяки збалансованому розподілу тиску вздовж вертикальної осі суттєво мінімізуються динамічні вібрації. Це забезпечує практично безшумну експлуатацію (рівень звукового тиску не перевищує 35 дБ), що робить установку безпечною та придатною для інтеграції безпосередньо в житлову інфраструктуру.

Специфічною перевагою вітрогенераторів типу «тюльпан» також є виникнення синергетичного ефекту при їх груповому розміщенні у формі так званого «букета» (кластера з 3-5 одиниць). На відміну від традиційних турбін, які потребують значної просторової дистанції для уникнення взаємної аеродинамічної інтерференції, ротори «тюльпан» демонструють найвищу ефективність при щільному розташуванні. Завдяки унікальній геометрії лопатей виникає позитивний кластерний ефект: турбіни перенаправляють та концентрують повітряні маси одна на одну, що дозволяє підвищити загальну продуктивність системи на 20-50% порівняно з поодинокими установками.

2 СИСТЕМА МІКРОГЕНЕРАЦІЇ ДЛЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ НА БАЗІ АЕРОДИНАМІЧНО-ЕФЕКТИВНИХ ВІТРОТУРБІН ТИПУ «ТЮЛЬПАН»

2.1 Початкові параметри для розробки системи

Об'єктом дослідження є приватний житловий будинок, розташований у місті Житомир (Житомирська область, Україна). Конструктивною особливістю будівлі є наявність плоскої експлуатованої покрівлі, яка виступає майданчиком для встановлення вітроенергетичного обладнання.

Будинок знаходиться в зоні змішаної забудови, де поєднуються об'єкти приватного сектору та щільні масиви багатоповерхівок. Таке розташування суттєво впливає на аеродинамічну обстановку: близькість висотних споруд спричиняє ефект «міських каньйонів», що характеризується підвищеною турбулентністю повітряних мас та частими змінами напрямку вітрових потоків. Ці чинники є визначальними при виборі вертикально-осьової установки типу «тюльпан», здатної ефективно працювати у нестабільних вітрових умовах міського середовища.

Основою для розміщення вітрогенераторної установки є плоска покрівля будівлі, що обмежена по периметру захисним парапетом (див. рисунок 2.1). Згідно з проєктною документацією, основна частина даху має габаритні розміри 13,6 x 9,1 м, тоді як загальна довжина конструкції з урахуванням виступаючих елементів становить 13,8 м. При плануванні місця монтажу ВЕУ враховано наявне інженерне обладнання, що створює зони обмеження та потенційну аеродинамічну тінь. Зокрема, на покрівлі розташовані блоки систем кондиціонування, мережа вентиляційних виходів, а також центральний світловий ліхтар (зенітне вікно).

Таке насичення даху конструктивними елементами потребує точного зонування для мінімізації впливу механічних перешкод на ефективність роботи вітрового ротора.

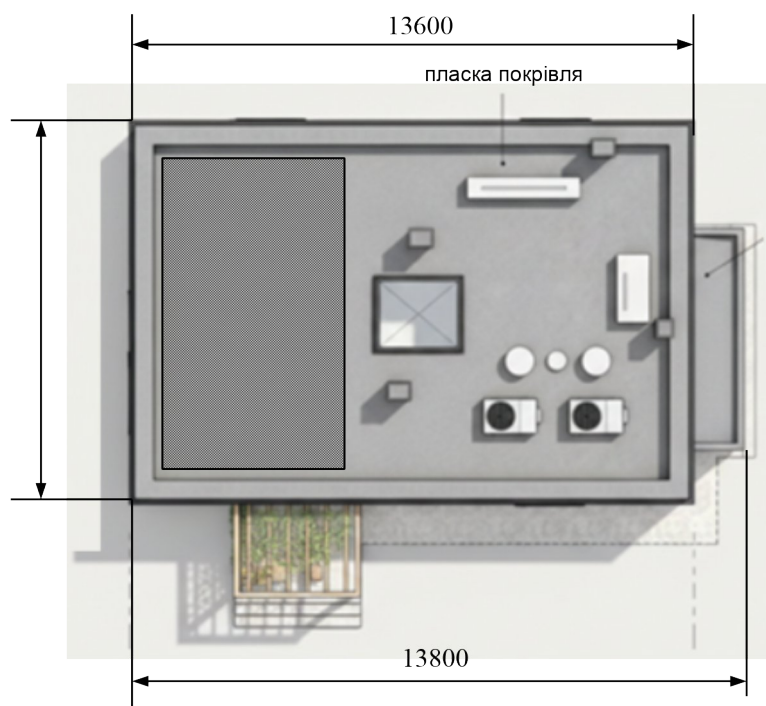


Рисунок 2.1 – План покрівлі приватного житлового будинку

У таблиці 2.1 систематизовано перелік основних побутових споживачів приватного житлового будинку із зазначенням їхньої активної потужності та тривалості роботи на добу. Ці технічні показники є базовими параметрами для подальшого розрахунку та розробки системи мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «ТЮЛЬПАН»

Таблиця 2.1 – Перелік побутових споживачів приватного житлового будинку та їх активна потужність

Категорія споживачів	Назва пристрою	Напруга живлення U, В	Потужність P, Вт	Струм споживання I, А	Тривалість роботи за добу, год.
1	2	3	4	5	6
Зв'язок та безпека	Wi-Fi, ONU, відеоспостереження	230	60	0,26	24
Опалення	Насос котла та автоматика	230	180	0,52	12
Водопостачання	Свердловинний насос / Станція	230	1500	4,78	0,5
Зберігання їжі	Холодильник (інверторний)	230	150	0,65	8

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
Освітлення	LED-лампи (весь будинок)	230	200	0,65	6
Робота та навчання	Ноутбуки (2 шт)	230	180	0,52	7
Гігієна та побут	Електрочайник	230	2000	8.70	0,2
	Пральна машина (без нагріву)	230	400	1.74	1
Гаджети	Зарядні пристрої, планшети та інше	230	100	0,22	4

2.2 Фундаментальні основи проектування та конфігурації вітроенергетичних установок

Вітроенергетична установка (ВЕУ) призначена для автономного забезпечення споживачів струмом зі стандартними параметрами 230 В та 50 Гц. Хоча традиційні системи потребують відкритих ділянок без аеродинамічних перешкод для досягнення максимального ККД, обрані нами установки типу "тюльпан" адаптовані до роботи в умовах турбулентності, характерних для щільної забудови. Завдяки вертикально-осьовій конструкції, ці ВЕУ ефективно перетворюють енергію вітру будь-якого напрямку навіть при низьких швидкостях повітряних потоків, що дозволяє відмовитися від використання високих щогл без втрати продуктивності.

Проектування вітроенергетичних установок базується на комплексному аналізі двох ключових чинників: сумарної потужності споживачів об'єкта та показників вітрового потенціалу конкретної місцевості. Такий підхід дозволяє оптимізувати параметри системи для забезпечення максимальної автономності будинку.

Сучасна науково-технічна база в галузі вітроенергетики вказує на необхідність комплексного передпроектного аналізу. Він включає порівняння конструктивних типів вітрогенераторів, детальне вивчення анемологічних характеристик місцевості та точний розрахунок енергоспоживання об'єкта.

Залежно від способу взаємодії з зовнішньою енергосистемою, виділяють три основні типи ВЕУ:

- автономні: функціонують незалежно від загальної мережі;
- мережеві: працюють паралельно з державною енергосистемою;
- гібридні (автономно-мережеві): поєднують переваги обох типів.

Автономні конфігурації (див. рис. 2.2) є оптимальним рішенням для територій, де підключення до централізованих ліній електропередач (ЛЕП) технічно неможливе або економічно недоцільне, а також для живлення мобільних чи ізольованих об'єктів.

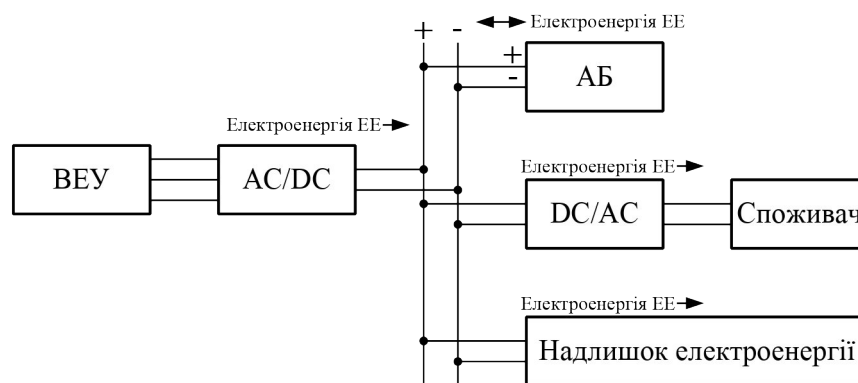


Рисунок 2.2 – Структурна схема автономної вітроенергетичної установки

Мережеві вітроенергетичні установки (див. рис. 2.3) призначені для генерації електричної енергії та її безпосередньої інтеграції в загальну електромережу. Функціонал таких систем передбачає два сценарії експлуатації: реалізацію надлишків виробленої енергії за «зеленим тарифом» або оптимізацію витрат шляхом прямого покриття власних енергопотреб об'єкта.

Гібридні (автономно-мережеві) вітроенергетичні системи (див. рис. 2.4) поєднують у собі функціональні можливості як автономних, так і мережевих рішень. Така інтеграція забезпечує максимальну гнучкість експлуатації, дозволяючи одночасно працювати паралельно з загальною мережею та підтримувати енергозабезпечення об'єкта в ізольованому режимі.

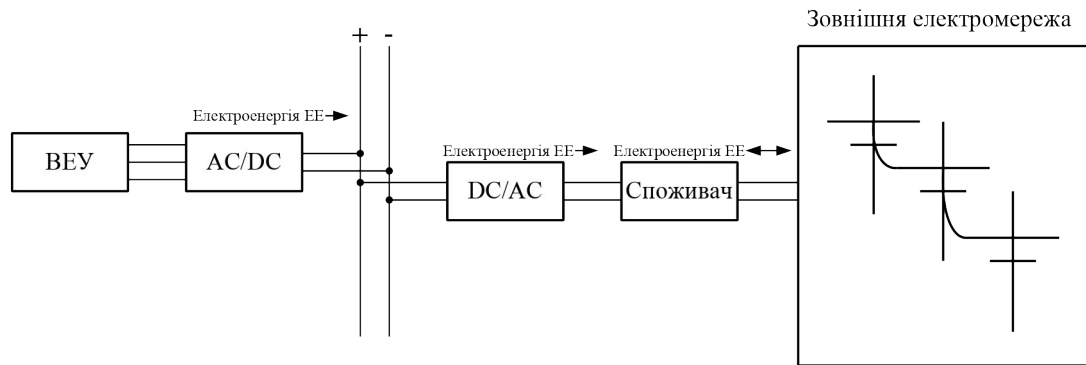


Рисунок 2.3 – Структурна схема мережевої вітроенергетичної установки

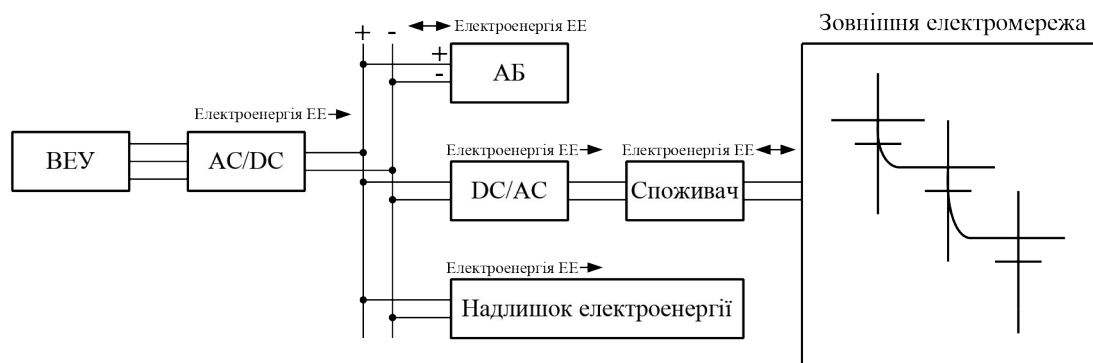


Рисунок 2.4 – Структурна схема гібридної вітроенергетичної установки

Беручи до уваги специфіку розглянутих конфігурацій, для реалізації даного проєкту пріоритетними є автономна або гібридна структури ВЕУ. Остаточний вибір оптимальної архітектури буде здійснено після детального розрахунку сумарного енергоспоживання будинку, визначення необхідної кількості вітрогенераторів типу "тюльпан" та аналізу вартості відповідного обладнання.

2.3 Визначення середнього показника енергоспоживання електричного обладнання житлового будинку

У підрозділі 2.1 даної дипломної роботи представлено перелік побутового електрообладнання приватного житлового будинку (див. табл. 2.1) із зазначенням номінальної активної потужності кожного пристрою. На

основі цих вихідних даних проведемо розрахунок середнього енергоспоживання будинку. Для цього спочатку визначимо добовий обсяг споживання електроенергії для кожної одиниці обладнання за наступною залежністю:

$$P_{\text{доба_сп}} = P_{\text{сп}} \cdot t, \quad (2.1)$$

де:

$P_{\text{доба_сп}}$ – добовий обсяг споживання електричної енергії окремим побутовим приладом або обладнанням, Вт·год.;

$P_{\text{сп}}$ – номінальна споживана активна потужність окремого побутового приладу або обладнання, Вт;

t – середньодобовий час експлуатації окремого побутового приладу або обладнання, год.

На основі виразу (2.1) та вихідних даних, наведених у табл. 2.1, отримаємо такі значення:

$$P_{\text{доба_Wi-Fi; ONU; відеосп.}} = 60 \cdot 24 = 1440 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_насос котла та автомат.}} = 180 \cdot 12 = 2160 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_свердловин. насос/станція}} = 1500 \cdot 0,5 = 750 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_холодильник}} = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_Led-лампи (весь будинок)}} = 200 \cdot 6 = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_ноутбуки}} = 180 \cdot 7 = 1260 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_ектروحайник}} = 2000 \cdot 0,2 = 400 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$P_{\text{доба_пральна машина}} = 400 \cdot 1 = 400 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$P_{\text{доба_заряд.пристрої; планшети}} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Наступним кроком визначимо сумарне добове енергоспоживання всіх електричних приладів у приватному житловому будинку:

$$\sum P_{\text{доба_сп}} = P_{\text{доба_сп1}} + P_{\text{доба_сп2}} + \dots + P_{\text{доба_спN}}, \quad (2.2)$$

де:

$\sum P_{\text{доба_сп}}$ – сумарне добове енергоспоживання електричної енергії всіма електричними побутовими приладами або обладнанням, Вт·год.;

$P_{\text{доба_сп}}$ – добовий обсяг споживання електричної енергії окремим побутовим приладом або обладнанням, Вт·год.

Отримаємо, що:

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{доба_сп}} &= 1440 + 2160 + 750 + 1200 + 1200 + 1260 + 400 + 400 + \\ &+ 400 = 9210 \text{ Вт}\cdot\text{год.} \end{aligned}$$

Наступним етапом є оцінка тижневого енергоспоживання всіх побутових приладів. Ці дані необхідні для виконання аеродинамічного розрахунку вітрогенератора та подальшого підбору оптимальної моделі обладнання. Розрахунок проводиться за такою формулою:

$$\sum P_{\text{сп_тижд.}} = 7 \cdot \sum P_{\text{сп_доба}}. \quad (2.3)$$

Матимемо:

$$\sum P_{\text{сп_тижд.}} = 7 \cdot 9210 = 64470 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Таким чином, розроблювана система альтернативного енергозабезпечення на базі вітрогенератора повинна бути розрахована на покриття тижневого навантаження приватного будинку, сумарна потужність споживання якого становить 64470 Вт·год.

2.4 Оцінка вітроенергетичного потенціалу району локації вітроелектричної установки

Відповідно до вихідних даних даної дипломної роботи, розробка вітрогенераторної системи альтернативного живлення передбачена для електрозабезпечення приватного житлового будинку у м. Житомир. У зв'язку з цим, аналіз та оцінка вітрового потенціалу виконується саме для даної локації.

Для розрахунків використано офіційні дані Гідрометеоцентру України щодо середньомісячних швидкостей та напрямків вітру за 2025 рік. На рисунку 2.5 представлено графік зміни середньомісячної швидкості вітру, а на рисунку 2.6 – відповідну розу вітрів для Житомирського регіону.

Аналіз наведених даних свідчить, що протягом року швидкість вітру коливається в межах 3,0-4,1 м/с. Максимальна вітрова активність спостерігається у зимовий період, тоді як мінімальні значення характерні для літніх місяців. Середньорічна швидкість вітру становить 3,6 м/с, що дозволяє класифікувати м. Житомир як зону зі слабким вітровим потенціалом. З огляду на це, для ефективної генерації електроенергії необхідно застосовувати вітроенергетичні установки, що мають високий коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ) саме в діапазоні малих швидкостей.



Рисунок 2.5 – Динаміка середньомісячної швидкості вітру в м. Житомир за 2025 рік

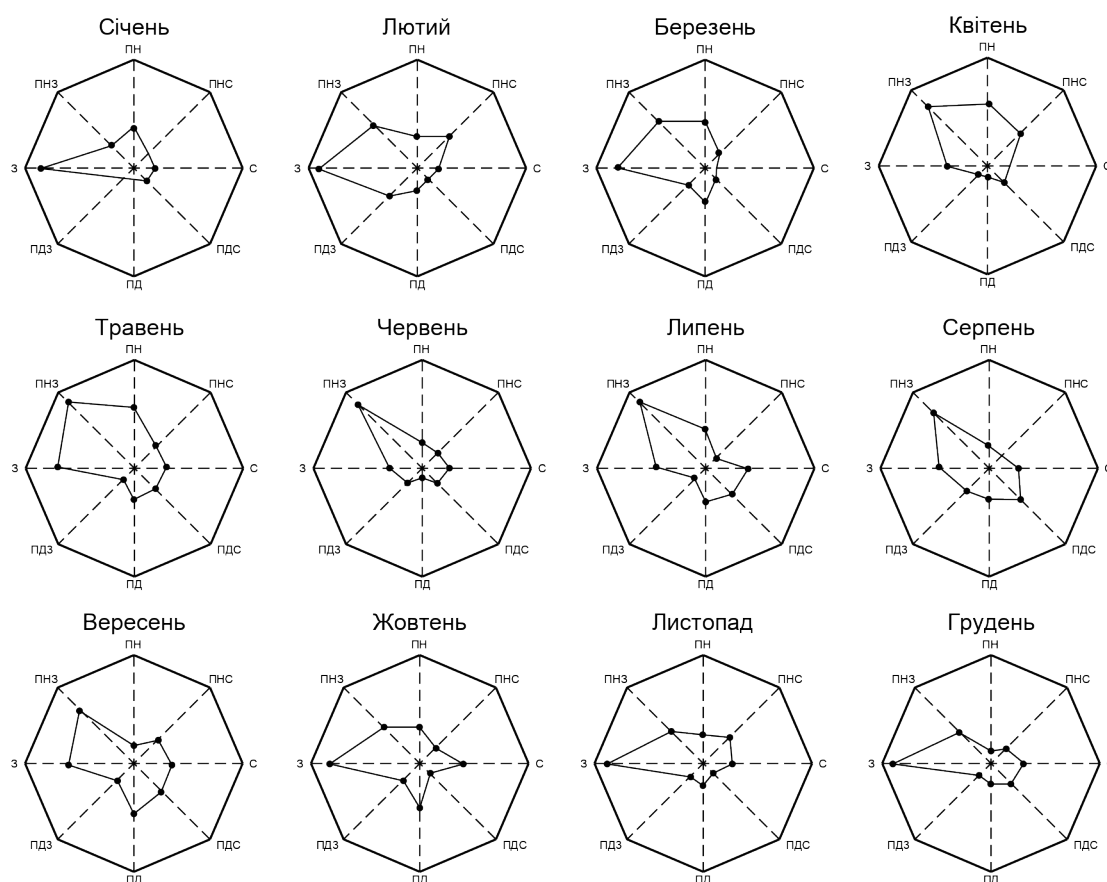


Рисунок 2.6 – Діаграма переважних напрямків та швидкостей вітру в Житомирському регіоні за 2025 рік

Аналіз рози вітрів у м. Житомирі за 2025 рік (див. рис. 2.6) засвідчив сезонну зміну повітряних потоків: у холодний період домінували західні вітри, а в теплий – північно-західні. Попри наявність чільних напрямків, протягом кожного місяця спостерігалася активність вітрів інших румбів.

З огляду на мінливість напрямків та переважно низьку швидкість вітру в даному регіоні, найбільш доцільним для розроблюваної системи є використання вертикально-осьового вітрогенератора. Його перевага полягає у відсутності потреби в орієнтації на вітер, що гарантує стабільну генерацію енергії за будь-якого вектора потоку. Отже, обрана нами конструкція вітрогенератора типу «тюльпан» є найбільш ефективним рішенням для забезпечення безперебійної роботи системи в конкретних географічних умовах.

2.5 Розрахунок аеродинамічних показників та оптимізація вибору моделі вітроустановки «тюльпан»

Зважаючи на сучасний стан енергосистеми України, вітчизняний ринок альтернативної енергетики пропонує широкий асортимент вертикально-осьових вітрогенераторів типу «тюльпан». Вартість таких установок варіюється залежно від потужності, якості матеріалів та репутації бренду. За критерієм «ціна-якість» для реалізації розроблюваної системи обрано обладнання європейського виробника Euro Wind, що спеціалізується на випуску моделей потужністю від 10 до 10000 Вт·год. (див. рис. 2.7).

Оскільки сумарне добове енергоспоживання всіх електричних приладів у приватному житловому будинку 7370 Вт·год. (51590 Вт·год. на тиждень), критично важливим є точний підбір потужності установки. Для оптимізації витрат та забезпечення енергетичної незалежності доцільно провести порівняльний аеродинамічний розрахунок декількох моделей. Це дозволить уникнути як зайвих витрат на надлишкову потужність, так і дефіциту енергії при виборі занадто слабкого генератора.



Модель генератора	Номінальна потужність, Вт*год	Максимальна потужність, Вт*год	Стартова швидкість вітру, м/с
EuroWind VS-0001 ⁺	10	17	2
EuroWind VS-002	200	260	2
EuroWind VS-003	300	400	2
EuroWind VS-005	500	650	2
EuroWind VS-01	1000	1300	2
EuroWind VS-03	1000	3600	2
EuroWind VS-05	5000	6000	2
EuroWind VS-10	10000	12000	2

Рисунок 2.7 – Модельний ряд вітрогенераторів «тюльпан» від компанії Euro Wind та їх технічні параметри

Попередній аналіз асортименту компанії Euro Wind дозволив виділити три моделі, що найбільш повно відповідають технічним умовам розроблюваної нами системи: модель VS-003, модель VS-005 та модель VS-01. Основні номінальні параметри цих вітрогенераторів систематизовано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні експлуатаційні характеристики вибраних моделей вітрогенераторів типу «тюльпан»

Параметри та одиниці вимірювання	VS-003 «Тюльпан»	VS-005 «Тюльпан»	VS-01 «Тюльпан»
1	2	3	4
Тип генератора	синхронний генератор з постійними магнітами		
Номінальна потужність $P_{\text{ВБУ}}$, Вт	300	500	1000
Вихідна напруга U , В	24	48	48
Тип вертикального ротора	H-rotor		
Радіус ротора R , м	0,65	0,85	1,05
Висота лопаті $H_{\text{ВР}}$, м	1,4	1,8	2,2
Кількість лопатей, шт.	3	3	3

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
Стартова швидкість вітру $V_{\text{В ст}}, \text{ м/с}$	1,5	2,0	2,0
Номінальна швидкість вітру $V_{\text{В ном}}, \text{ м/с}$	12	12	12
Максимальна швидкість вітру $V_{\text{В макс}}, \text{ м/с}$	40	40	40

Для остаточного вибору оптимальної моделі вітрогенератора типу «тюльпан» у межах даного дипломної роботи проведемо аеродинамічний розрахунок. Попри наявність паспортних даних про номінальну потужність, для об'єктивного аналізу необхідно розрахувати фактичну погодинну генерацію енергії. Цей показник визначатиметься з урахуванням середньомісячних коливань швидкості вітру для кожної пори року за наступною формулою:

$$N_{\text{ВУ}_\text{год}} = n_{\text{лоп.}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot V^3, \quad (2.4)$$

де:

$N_{\text{ВУ}_\text{год}}$ – величина енерговиробітку вітрогенератора за одну годину експлуатації, Вт·год.;

$n_{\text{лоп.}}$ – число лопатей вертикально-осьового ротора, шт.;

A – омітальна площа (або загальна площа перерізу) вітрового колеса, м^2 ;

V – швидкість набігаючого вітрового потоку (згідно з рис. 2.5), м/с ;

ρ – питома щільність повітряного середовища, кг/м^3 .

Для забезпечення точності аеродинамічного розрахунку обраних вітроустановок «тюльпан», значення питомої щільності повітряного середовища обчислимо за наступною залежністю:

$$\rho = M_n / V_n , \quad (2.5)$$

де:

M_n – розрахункова маса повітря, кг;

V_n – відповідний об'єм повітряного потоку, м³.

За нормальних метеорологічних умов показник атмосферного тиску становить приблизно $P_{ст} = 0,1013$ МПа, а температура довкілля відповідає $T_{ст} = 293$ К (20°C). За таких параметрів розрахункова маса повітря приймається рівною 28,979 кг, а його об'єм – 24,055 м³.

Таким чином, підставивши вихідні дані у вираз (2.5), отримаємо:

$$\rho = \frac{28,979}{24,055} = 1,205 \text{ кг/м}^3.$$

Наступним кроком є визначення омітальної площі вітрового колеса для кожної з обраних моделей вітрогенераторів:

$$A = 2 \cdot R \cdot H_{BP} , \quad (2.6)$$

де:

R – радіус ротора вітроустановки, м;

H_{BP} – висота лопаті вертикально-осьового ротора, м.

Підсумкові розрахункові показники за виразом 2.6 для обраних моделей вітрогенераторів мають наступний вигляд:

$$A_{VS-003} = 2 \cdot 0,65 \cdot 1,4 = 1,82 \text{ м}^2;$$

$$A_{VS-005} = 2 \cdot 0,85 \cdot 1,8 = 3,06 \text{ м}^2;$$

$$A_{VS-01} = 2 \cdot 1,05 \cdot 2,2 = 4,62 \text{ м}^2.$$

Наступним етапом є визначення енерговиробітку обраних моделей вітрогенераторів типу «тюльпан» (див. табл. 2.2). Розрахунок годинної потужності виконаємо за формулою (2.4), а тижневу генерацію визначимо за залежністю (2.7). Зазначені обчислення проведемо з урахуванням помісячної динаміку вітрової активності протягом усіх сезонів року.

$$N_{\text{ВУ_тиждень}} = 168 \cdot N_{\text{ВУ_год}} , \quad (2.7)$$

де:

$N_{\text{ВУ_год}}$ – величина енерговиробітку вітрогенератора за одну годину експлуатації, Вт·год.;

$N_{\text{ВУ_тиждень}}$ – розрахунковий тижневий енерговиробіток вітрогенератора, Вт·год.

Отже, розрахункові значення тижневої генерації електроенергії для обраних моделей вітроустановок у січні становлять:

$$N_{\text{VS-003_год}} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 4^3 = 210,5 \text{ Вт·год.};$$

$$N_{\text{VS-005_год}} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 4^3 = 353,9 \text{ Вт·год.};$$

$$N_{\text{VS-01_год}} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 4^3 = 534,4 \text{ Вт·год.};$$

$$N_{\text{VS-003_тиж}} = 168 \cdot 210,5 = 35364 \text{ Вт·год.};$$

$$N_{\text{VS-005_тиж}} = 168 \cdot 353,9 = 59455,2 \text{ Вт·год.};$$

$$N_{\text{VS-01_тиж}} = 168 \cdot 534,4 = 89786 \text{ Вт·год.}$$

Далі визначимо прогнозний тижневий виробіток електроенергії для обраних вітроустановок з урахуванням метеорологічних умов лютого:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,9^3 = 195,1 \text{ Вт}\cdot\text{год};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,9^3 = 328,9 \text{ Вт}\cdot\text{год};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,9^3 = 495,4 \text{ Вт}\cdot\text{год};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 195,1 = 32776,8 \text{ Вт}\cdot\text{год};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 328,9 = 55255,2 \text{ Вт}\cdot\text{год};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 495,4 = 83227,2 \text{ Вт}\cdot\text{год}.$$

Розрахунковий тижневий виробіток електроенергії для обраних моделей вітрогенераторів протягом березня становитиме:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 4^3 = 210,5 \text{ Вт}\cdot\text{год} ;$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 4^3 = 353,9 \text{ Вт}\cdot\text{год} ;$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 4^3 = 534,4 \text{ Вт}\cdot\text{год} ;$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 210,5 = 35364 \text{ Вт}\cdot\text{год} ;$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 353,9 = 59455,2 \text{ Вт}\cdot\text{год};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 534,4 = 89786 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

За результатами обчислень, параметри генерації електроенергії у квітні становитимуть:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,8^3 = 180,5 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,8^3 = 303,5 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,8^3 = 458,2 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 180,5 = 30324 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 303,5 = 50988 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 458,2 = 76977,6 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Розрахункові показники енерговиробітку за травень мають наступний вигляд:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,3^3 = 118,2 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,3^3 = 198,7 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,3^3 = 300,1 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 118,2 = 19857,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 198,7 = 33381,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 300,1 = 50416,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Розрахункові обсяги генерації електроенергії обраними моделями вітроустановок у червні становитимуть:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,2^3 = 107,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,2^3 = 181,2 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,2^3 = 273,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 107,8 = 18110,4 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 181,2 = 30441,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 273,6 = 45964,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Прогнозована генерація електроенергії досліджуваними вітрогенераторами протягом липня становитиме:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,1^3 = 98 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,1^3 = 164,7 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,1^3 = 248,8 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 98 = 16464 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 164,7 = 27669,6 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 248,8 = 41798,4 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Розрахункові значення генерації електроенергії у серпні матимуть такий вигляд:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3^3 = 88,8 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3^3 = 149,3 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3^3 = 225,5 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 88,8 = 14918,4 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 149,3 = 25082,4 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 225,5 = 37884 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Переходячи до осіннього періоду, визначимо показники тижневого виробітку електроенергії обраними моделями вітрогенераторів у вересні:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,3^3 = 118,2 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,3^3 = 198,7 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,3^3 = 300,1 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 118,2 = 19857,6 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 198,7 = 33381,6 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 300,1 = 50416,8 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Нижче наведено результати обчислень тижневого енерговиробітку обраних моделей вітрогенераторів для жовтня:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,6^3 = 153,5 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,6^3 = 258 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,6^3 = 389,6 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 153,5 = 25788 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 258 = 43344 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 389,6 = 65452,8 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Розрахункові показники за листопад становлять:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 3,7^3 = 166,6 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 3,7^3 = 280,1 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 3,7^3 = 422,9 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 166,6 = 27988,8 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 280,1 = 47056,8 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 422,9 = 71047,2 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

На завершення проведемо розрахунок тижневого виробітку електроенергії обраними моделями вітрогенераторів для грудня:

$$N_{VS-003_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 1,82 \cdot 4,1^3 = 226,8 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-005_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 3,06 \cdot 4,1^3 = 381,1 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-01_год} = 3 \cdot \frac{1,205}{2} \cdot 4,62 \cdot 4,1^3 = 575,5 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-003_тиж} = 168 \cdot 226,8 = 38102,4 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-005_тиж} = 168 \cdot 381,1 = 64024,8 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$N_{VS-01_тиж} = 168 \cdot 575,5 = 96684 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

На основі отриманих даних визначимо середньотижневі показники виробітку електроенергії для кожної моделі вітрогенератора типу «тюльпан» у розрізі сезонів року. Розрахунок проведемо за наступною залежністю:

$$N_{\text{ВУ_сер.}} = \frac{N_{\text{ВУ_заг._п.р.}}}{3}, \quad (2.8)$$

де:

$N_{\text{ВУ_сер.}}$ – середньотижневий енерговирібок вітрогенератора за певний сезон року, Вт·год.;

$N_{\text{ВУ_заг._п.р.}}$ – сумарний тижневий виробіток електроенергії вітроустановкою за відповідний сезон, Вт·год.

Таким чином, середньотижневий енерговирібок обраних моделей вітрогенераторів протягом зимового сезону становить:

$$N_{\text{VS-003_зима}} = \frac{38102,4 + 35364 + 32776,8}{3} = 35414,4 \text{ Вт·год. ;}$$

$$N_{\text{VS-005_зима}} = \frac{64024,8 + 59455,2 + 55255,2}{3} = 59578,4 \text{ Вт·год. ;}$$

$$N_{\text{VS-01_зима}} = \frac{96684 + 89786 + 83227,2}{3} = 89899,1 \text{ Вт·год.}$$

Середньотижневий енерговирібок обраних моделей вітрогенераторів протягом весняного сезону становить:

$$N_{\text{VS-003_весна}} = \frac{35364 + 30324 + 19857,6}{3} = 28515,2 \text{ Вт·год. ;}$$

$$N_{\text{VS-005_весна}} = \frac{59455,2 + 50988 + 33381,6}{3} = 47941,6 \text{ Вт·год. ;}$$

$$N_{VS-01_весна} = \frac{89786 + 76977,6 + 50416,8}{3} = 72393,5 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Середньотижневий енерговиробіток обраних моделей вітроустановок у літній період становить:

$$N_{VS-003_літо} = \frac{18110,4 + 16464 + 14918,4}{3} = 16497,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-005_літо} = \frac{30441,6 + 27669,6 + 25082,4}{3} = 27731,2 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-01_літо} = \frac{45964,8 + 41798,4 + 37884}{3} = 41882,4 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Середньотижневий енерговиробіток досліджуваних моделей вітрогенераторів протягом осіннього сезону становить:

$$N_{VS-003_осінь} = \frac{19857,6 + 25788 + 27988,8}{3} = 24544,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-005_осінь} = \frac{33381,6 + 43344 + 47056,8}{3} = 41260,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{VS-01_осінь} = \frac{50416,8 + 65452,8 + 71047,2}{3} = 62305,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

На завершальному етапі обчислимо середньорічний показник тижневого енерговиробітку для обраних моделей вітрогенераторів за наступною залежністю:

$$N_{\text{ВУ_сер.}} = \frac{N_{\text{ВУ_зима}} + N_{\text{ВУ_весна}} + N_{\text{ВУ_літо}} + N_{\text{ВУ_осінь}}}{4} \cdot C_v, \quad (2.9)$$

де:

C_v – коефіцієнт варіації (мінливості) вітрового потоку протягом року.

Значення коефіцієнта, що характеризує нестабільність вітру залежить від кліматичної зони, але для інженерних розрахунків у вітроенергетиці існують загальноприйняті межі. Для території України та помірних широт його значення зазвичай приймають рівним 0,45.

Отже, враховуючі це, матимемо:

$$N_{\text{VS-003_сер.}} = \frac{35414,4 + 28515,2 + 16497,6 + 24544,8}{4} \cdot 0,45 =$$

$$= 11809,4 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{\text{VS-005_сер.}} = \frac{59578,4 + 47941,6 + 27731,2 + 41260,8}{4} \cdot 0,45 =$$

$$= 19857,6 \text{ Вт}\cdot\text{год.};$$

$$N_{\text{VS-01_сер.}} = \frac{89899,1 + 72393,5 + 41882,4 + 62305,6}{4} \cdot 0,45 == 29979 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Аналіз результатів розрахунку показує, що за умови індивідуального використання жодна з обраних моделей вітрогенераторів типу «тюльпан» не здатна повністю забезпечити тижневу потребу приватного житлового будинку в електроенергії, яка становить 64470 Вт·год. Проте технічною перевагою установок такого типу є можливість їх експлуатації в групах по три або п'ять одиниць. Таке кластерне розміщення («букет») дозволяє підвищити сумарну енергопродуктивність системи на 20-50% завдяки взаємодії та спрямованості повітряних потоків між роторами. З огляду на це,

виконаємо перевірку ефективності кожної моделі при роботі в системі з трьох одиниць згідно з виразом 2.10.

$$N_{\text{ВУ}_{\text{сер.}}\text{"букет"}} = n_{\text{ВГ}} \cdot N_{\text{ВУ}_{\text{сер.}}} \cdot \beta, \quad (2.10)$$

де:

$N_{\text{ВУ}_{\text{сер.}}\text{"букет"}}$ – середньорічний тижневий енерговиробіток обраних моделей вітрогенераторів за умови їх кластерного об'єднання у «букет», Вт·год.;

$N_{\text{ВУ}_{\text{сер.}}}$ – середньорічний тижневий енерговиробіток одиничної вітроустановки конкретної моделі, Вт·год.;

$n_{\text{ВГ}}$ – кількість вітрогенераторів у складі енергосистеми типу «букет», шт.;

β – коефіцієнт групової ефективності вітрогенераторів у складі «букета» з трьох робочих одиниць (його приймають рівним значенню $\beta = 1,2$).

Результати обчислень за виразом 2.10 мають наступний вигляд:

$$N_{\text{VS-003}_{\text{сер.}}\text{"букет"}} = 3 \cdot 11809,4 \cdot 1,2 = 42513,8 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{\text{VS-005}_{\text{сер.}}\text{"букет"}} = 3 \cdot 19857,6 \cdot 1,2 = 71487,4 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

$$N_{\text{VS-01}_{\text{сер.}}\text{"букет"}} = 3 \cdot 29979 \cdot 1,2 = 107924,4 \text{ Вт} \cdot \text{год.}.$$

Порівняльна характеристика розрахункових даних свідчить, що кластерне об'єднання трьох вітрогенераторів дозволяє двом із трьох обраних моделей досягти цільових показників генерації. Враховуючи необхідність мінімізації капітальних витрат при збереженні високої продуктивності, оптимальним рішенням є використання моделі EuroWind VS-005 «Тюльпан». При тижневому споживанні об'єкта на рівні 64470 Вт·год., обрана система генерує 71487,4 Вт·год. на тиждень, що підтверджує її технічну відповідність заданим вимогам.

2.6 Обґрунтування вибору та розрахунок параметрів інвертора

Інвертори – це напівпровідникові перетворювачі електричної енергії, призначені для трансформації постійного струму (DC) у змінний (AC). Ці пристрої є критично важливими для забезпечення живлення споживачів, що працюють у мережах зі стандартною напругою 220 В або 380 В.

Функціональну основу інвертора становить комутатор, який із заданою частотою змінює полярність підключення навантаження до джерела постійної напруги, формуючи таким чином змінний струм. Процес керування комутаційними елементами здійснюється електронною схемою на базі сучасних мікроконтролерів. Залежно від призначення, конструкція приладу може додатково містити підвищувальні або знижувальні трансформатори, блоки фільтрації сигналу, а також модулі стабілізації та багаторівневого захисту.

Сучасні інверторні системи класифікують за типом взаємодії з енергомережею на три основні категорії:

- мережеві (on-grid) – працюють синхронно із загальною мережею;
- автономні (off-grid) – функціонують незалежно від зовнішніх мереж;
- гібридні – поєднують можливості обох попередніх типів.

Хоча вихідні каскади зазначених типів інверторів мають подібну архітектуру, їхні основні відмінності зосереджені в алгоритмах та схемах керування.

Мережевий інвертор функціонує в режимі синхронізації з промисловою електромережею, тоді як автономний обладнаний власним генератором опорної частоти. Гібридні пристрої є універсальними та поєднують у собі функціональні можливості обох типів. Спільним критерієм для будь-якого сучасного інвертора є висока енергоефективність: його коефіцієнт корисної дії (ККД) має перевищувати 90%.

Автономні інвертори здійснюють перетворення енергії, накопиченої в акумуляторних батареях. Вхідна напруга для таких пристроїв обирається зі

стандартного ряду: 12, 24, 48 або 120 В. Вибір вищої вхідної напруги дозволяє спростити схемотехніку силової частини та підвищити загальний ККД системи. При цьому вимоги до форми вихідного сигналу в автономних системах можуть бути дещо менш суворими, ніж у мережевих. Проте критично важливим параметром є стабільність ККД при змінних режимах роботи: ефективність пристрою не повинна суттєво падати навіть при навантаженні, що становить лише 10% від номінальної потужності.

До вихідних характеристик мережевих інверторів висуваються жорсткі вимоги щодо якості синусоїди та стабільності частоти. Для мінімізації втрат при перетворенні такі пристрої зазвичай працюють з високими вхідними напругами. Оскільки живлення надходить безпосередньо від відновлюваних джерел енергії, мережеві моделі обов'язково оснащуються контролерами пошуку точки максимальної потужності (MPPT), що дозволяє оптимізувати відбір енергії.

Загальні принципи побудови системи альтернативного живлення на основі вітрогенераторів були розглянуті раніше у підрозділі 2.2. Однак остаточне формування структури системи стало можливим лише після виконання аеродинамічного розрахунку, обґрунтування конкретної моделі та визначення оптимальної кількості вітроустановок, що було детально описано у підрозділі 2.5.

Таким чином, на основі попередніх розрахунків встановлено, що найбільш доцільною є реалізація автономно-мережевої (гібридної) структури системи. Даний вибір зумовлений високою продуктивністю обраної моделі вітрогенератора. На відміну від суто автономних комплексів, де генерація припиняється після повного заряду акумуляторів, гібридна схема дозволяє ефективно використовувати надлишкову енергію. Продаж залишків виробленої електрики в загальну мережу забезпечить додатковий економічний ефект та суттєво скоротить термін окупності всієї інженерної розробки.

Враховуючи викладені аргументи, можна дійти висновку, що для реалізації нашої розроблюваної системи оптимальним є використання інвертора гібридного (автономно-мережевого) типу. Однак безпосередньому вибору конкретної моделі має передувати розрахунок необхідної вхідної потужності постійного струму з урахуванням втрат на перетворення та номінальних робочих характеристик пристрою.

Розрахункове значення енергії постійного струму з урахуванням втрат на перетворення в інверторі визначається за формулою:

$$E_{\text{інверт.}} = k \cdot \sum P_{\text{сп_тижд.}} , \quad (2.11)$$

де:

$E_{\text{інверт.}}$ – енергія постійного струму на вході інвертора (DC-енергія), Вт·год;

k – коефіцієнт, що враховує втрати при перетворенні енергії в інверторі (прийнятий рівним 1,2);

$\sum P_{\text{сп_тижд.}}$ – сумарне добове енергоспоживання електричної енергії всіма електричними побутовими приладами або обладнанням, Вт·год.

Отримаємо, що:

$$E_{\text{інверт.}} = 1,2 \cdot 64470 = 77364 \text{ Вт·год.}$$

Для коректного підбору моделі інвертора проведемо розрахунок його встановленої потужності:

$$P_{\text{інверт.}} = \frac{E_{\text{інверт.}} \cdot \gamma}{n_{\text{рд_інв.}}} , \quad (2.12)$$

де:

$P_{\text{інверт.}}$ – розрахункова електрична потужність інвертора, Вт;

$n_{\text{рд_інв.}}$ – тривалість роботи інвертора протягом тижня, діб.

γ – коефіцієнт завантаження (або використання) потужності інвертора (приймається в межах 0,2–0,3).

Будемо мати, що:

$$P_{\text{інверт.}} = \frac{77364 \cdot 0,3}{7} = 3315,6 \text{ Вт.}$$

Згідно з проведеними розрахунками, необхідна потужність системи становить 3315,6 Вт. При виборі перетворювального обладнання критично важливо забезпечити експлуатаційний запас потужності на рівні 20–30%. Такий резерв необхідний для компенсації короточасних пускових струмів (що виникають при ввімкненні обладнання з електродвигунами: насосів, холодильників тощо), а також для запобігання перегріву силових елементів при тривалій роботі.

Враховуючи стандартний модельний ряд виробників, варіанти потужністю 3,5 кВт є недоцільними, оскільки робота на межі граничних можливостей суттєво скорочує термін служби пристрою. Оптимальним рішенням для нашої системи є інвертор із номінальною потужністю 5 кВт (5000 Вт).

Серед доступних варіантів обрано модель Ахіота Energy ISMPPT BFP 5000 (див. рисунок 2.8). Дане рішення є одним із найпопулярніших на ринку України завдяки раціональному співвідношенню вартості та функціональних можливостей.



Рисунок 2.8 – Гібридний інвертор Axioma Energy ISMPPT BFP 5000

Ключові переваги обраної моделі:

- інтегрований MPPT-контролер: дозволяє максимально ефективно перетворювати енергію, що надходить від відновлюваних джерел;
- гнучкість режимів: можливість роботи в мережевому режимі навіть за відсутності акумуляторних батарей;
- ергономічність: наявність знімної панелі керування спрощує моніторинг та налаштування системи;
- економічна доцільність: модель значно доступніша за європейські аналоги, проста в монтажі та подальшому технічному обслуговуванні.

Завдяки вбудованому універсальному зарядному пристрою, обраний інвертор дозволяє накопичувати енергію з різних джерел: загальної електромережі або системи вітрогенераторів. Таке рішення забезпечує додаткову експлуатаційну надійність: у безвітряні періоди система автоматично підтримує необхідний рівень заряду акумуляторів від мережі, зберігаючи постійну готовність до автономної роботи

Таким чином, інвертор Axioma Energy ISMPPT BFP 5000 повністю задовольняє технічним вимогам нашої дипломної роботи та забезпечує надійну роботу вітрогенераторної системи в автономно-мережевому режимі.

Технічні характеристики інвертора Axioma Energy ISMPPT BFP 5000 наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики інвертора Axioma Energy ISMPPT BFP 5000

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ
Номінальна потужність	5000 Вт / 5000 В·А
Пікова (короткочасна) потужність	10000 В·А
Тип інвертора	Гібридний (автономно-мережевий)
Форма вихідної напруги	Чиста синусоїда
Вихідна напруга (АС)	230 В ± 5%
Частота вихідного сигналу	50/60 Гц (автовизначення)
Номінальна напруга акумуляторів (DC)	48 В
Макс. напруга розімкнутого ланцюга (PV)	500 В
Діапазон робочої напруги MPPT	120 – 450 В
Максимальний струм заряду	80 А (комбінований: мережа + PV)
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	93%
Час перемикання на резерв	10 мс (для ПК), 20 мс (для побутової техніки)
Габаритні розміри (Д х Ш х В)	100 x 300 x 440 мм
Вага	10 кг

2.7 Розрахунок параметрів та обґрунтування вибору акумуляторних батарей

Акумуляторні батареї (АКБ) – це відновлювані джерела постійного струму, придатні для багаторазового циклічного використання. Ключовою особливістю таких пристроїв є здатність накопичувати енергію під час заряджання та віддавати її споживачам протягом встановленого експлуатаційного періоду.

Визначальним параметром АКБ є її ємність, що вимірюється в ампер-годинах (А·год.). Вона визначає тривалість автономної роботи системи під навантаженням і безпосередньо корелює з вартістю та ресурсом обладнання. Для визначення необхідної потужності накопичувачів у складі

розроблюваної нами вітроенергетичної установки для приватного житлового будинку використаємо наступну розрахункову формулу:

$$C_{\text{АБ_заг.}} = \frac{\sum P_{\text{сп}} \cdot t}{U \cdot k}, \quad (2.13)$$

де:

$C_{\text{АБ_заг.}}$ – сумарна ємність акумуляторного блоку, А·год;

$\sum P_{\text{сп}}$ – сукупна потужність усіх електроприладів у квартирі, Вт;

t – розрахунковий час автономного живлення від батарей, год.;

k – коефіцієнт глибини розряду (частка ємності, що фактично використовується);

U – номінальна напруга акумуляторної групи, В.

Для врахування можливого неповного заряду акумуляторів вводиться коефіцієнт k , значення якого зазвичай становить 0,95 (що еквівалентно 95% від номінальної ємності). Розрахунок загальної ємності АКБ також базується на сумарній потужності всіх енергоспоживачів об'єкта. Даний показник обчислюється на основі вихідних даних Таблиці 2.1 із застосуванням формули (2.14):

$$\sum P_{\text{сп}} = P_{\text{сп1}} + P_{\text{сп2}} + \dots + P_{\text{спN}}, \quad (2.14)$$

де:

$P_{\text{сп}}$ – номінальна споживана активна потужність окремого побутового приладу або обладнання, Вт.

Таким чином, підставивши вихідні дані у вираз (2.14), отримаємо наступний результат:

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{сп}} &= 60 + 180 + 1500 + 150 + 200 + 180 + 2000 + 400 + 100 = \\ &= 4770 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Для розрахунку системи приймемо тривалість автономної роботи акумуляторів $t = 5$ год., а коефіцієнт ефективності заряду $k = 0,95$. Оскільки обраний інвертор працює з напругою 48 В, робоча напруга акумуляторного блоку U також прийматиметься рівною цьому значенню. Відповідно до виразу (2.13), отримаємо:

$$C_{\text{АБ заг.}} = \frac{4770 \cdot 5}{48 \cdot 0,95} = 523 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Сучасний ринок України пропонує широкий асортимент накопичувачів енергії, вартість яких безпосередньо залежить від їхніх технічних характеристик. При розробці системи альтернативного енергозабезпечення на базі вітрогенератора «тюльпан» було дотримано суворого балансу між максимальною ємністю та економічною доцільністю. З огляду на це, для комплектації об'єкта обрано літій-залізо-фосфатні акумулятори Challenger LiFePO₄ 48-100 з номінальною напругою 48 В та ємністю 100 А·год (див. рисунок 2.9).

Даний вибір обумовлений декількома критичними факторами. По-перше, технологія LiFePO₄ суттєво переважає традиційні свинцево-кислотні аналоги за показниками циклічного ресурсу (понад 6000 циклів) та глибини розряду (до 90% без втрати ємності), що гарантує стабільну роботу системи протягом 10-15 років в умовах регулярної експлуатації. По-друге, використання модулів напругою 48 В дозволяє оптимізувати роботу силової частини: вища напруга в ланцюзі постійного струму знижує силу струму при передачі потужності, що мінімізує теплові втрати в провідниках і дозволяє використовувати кабелі меншого перерізу.

Додатковим аргументом на користь обраної моделі АКБ є відсутність зовнішніх дисплеїв та складних інтерфейсів, що є технічно й економічно обґрунтованим рішенням. Відмова від елементів візуалізації дозволяє

знизити вартість кожного модуля на 10-15% без втрати функціональності. При цьому високий рівень безпеки забезпечується інтегрованою системою BMS, яка в автоматичному режимі здійснює балансування осередків та захищає акумулятор від перевантажень.



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд акумуляторної батареї Challenger LiFePO4 48-100

Для забезпечення розрахункових параметрів енергосистеми визначимо необхідну кількість акумуляторних батарей обраної моделі за наступною залежністю:

$$n_{AB} = \frac{C_{AB \text{ заг.}}}{C_{AB}}, \quad (2.15)$$

де:

n_{AB} – загальна кількість акумуляторних модулів у складі системи, од.;

$C_{AB \text{ заг.}}$ – сумарна ємність акумуляторного блоку, А·год.;

C_{AB} – номінальна ємність однієї акумуляторної батареї обраної моделі, А·год.

Отримаємо:

$$n_{AB} = \frac{523}{100} = 5,23 \text{ шт.} \approx 6 \text{ од.}$$

2.8 Вибір комутаційного обладнання для автоматичного перемикання джерел живлення

Для забезпечення безперебійної роботи системи енергопостачання ключовим елементом є пристрій автоматичного введення резерву (АВР). Його функціональне призначення полягає в оперативному перемиканні споживачів між незалежними джерелами живлення у разі виходу параметрів основної мережі за встановлені межі. Робочий цикл пристрою базується на безперервному моніторингу вхідної напруги блоком керування, який при виявленні дестабілізації подає сигнал на силові комутаційні апарати для перерозподілу енергопотоків.

Апаратно логіка керування АВР реалізується на базі мікропроцесорних контролерів або спеціалізованих реле (напруги, фазного контролю та часових затримок). Безпосередню комутацію силових ланцюгів здійснюють електромагнітні чи тиристорні контактори, а також автоматичні вимикачі, оснащені електроприводами або соленоїдними механізмами.

Критично важливим аспектом проектування вузла є виключення можливості зустрічного ввімкнення джерел енергії. Для цього в АВР інтегрується дворівнева система захисту:

- електричне блокування: реалізується через перехресне підключення допоміжних реле в ланцюгах керування;
- механічне блокування: забезпечує фізичне перешкоджання одночасному замиканню силових контактів безпосередньо в конструкції пристрою.

Зважаючи на широкий асортимент пристроїв автоматичного введення резерву (АВР) на ринку, вибір конкретної моделі має базуватися на попередніх розрахунках системи енергозабезпечення. Для реалізації схеми альтернативного живлення приватного житлового будинку використано групу з трьох вітрогенераторів типу «тюльпан» сумарною потужністю 1500 Вт (3 одиниці по 500 Вт кожна). Відповідно до визначених параметрів, для забезпечення стабільної комутації обрано АВР компанії Mezeen (серія MZQ3-2P). Зовнішній вигляд пристрою наведено на рисунку 2.10, а його технічні параметри систематизовано в табл. 2.4.

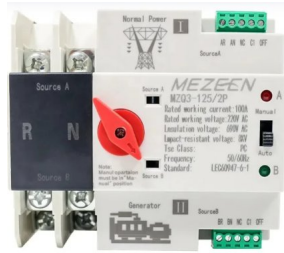


Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд пристрою автоматичного введення резерву Mezeen серії MZQ3-2P

Таблиця 2.4 – Основні технічні параметри пристрою АВР Mezeen серії MZQ3-2P

Кількість фаз мережі	Однофазна (2P)
Номінальна напруга (U_n)	230 В
Номінальна частота (f)	50 Гц
Максимальна комутаційна потужність	1800 Вт
Номінальний струм контактів (I_{max})	125 А
Кількість джерел живлення (вводів)	2 шт. (основне / резервне)
Максимальний час перемикання	0,05 с (50 мс)
Клас захисту корпусу	IP54

2.9 Техніко-економічне обґрунтування вибору засобу обліку електроенергії

Для організації моніторингу енергопотоків у проєктованій системі мікрогенерації для житлового будинку виникає потреба в інсталяції вузла обліку. Обґрунтування вибору конкретної моделі лічильника базується на порівняльному аналізі технічних характеристик індукційних та електронних приладів, результати якого систематизовано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняльний аналіз характеристик індукційних та електронних засобів обліку

Параметр порівняння	Індукційні (механічні) лічильники	Електронні (статичні) лічильники
1	2	3

Принцип вимірювання	Електромагнітна взаємодія з рухомим диском	Цифрова обробка електричних сигналів
Клас точності	Низький (2.0 – 2.5)	Високий (0.5 – 1.0)
Поріг чутливості	Низький (повільна реакція на малі струми)	Високий (фіксація генерації від 0,01 А)
Багатотарифний облік	Не підтримується	Підтримка тарифів (день/ніч)
Інформативність	Тільки загальна спожита енергія	Поточна потужність, напруга, струм, журнал подій
Габарити та монтаж	Великі розміри, кріплення на гвинти	Компактні (модульні), монтаж на DIN-рейку
Вплив зовнішніх полів	Чутливі до магнітних маніпуляцій	Високий ступінь антимагнітного захисту
Термін експлуатації	20–30 років (але з втратою точності)	25–30 років (стабільна точність)

На основі проведеного порівняльного аналізу та враховуючи необхідність інтеграції розроблюваної системи альтернативного живлення в загальну мережу та забезпечення високої точності вимірювань, для обліку обрано електронний лічильник. Оптимальним рішенням за технічними та експлуатаційними характеристиками є однофазний статичний прилад GAMA 100 (модель G1B 154). Обраний лічильник підтримує багатотарифний режим та двонаправлений облік (генерація/споживання), що є обов'язковою умовою для систем, що працюють за «зеленим» тарифом. Пристрій розрахований на номінальну напругу 230 В та максимальний струм до 60 А (80 А залежно від модифікації), що повністю задовольняє потреби об'єкта з встановленою потужністю ВЕУ 1500 Вт. Візуалізація обраної моделі лічильника електричної енергії представлена на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Електронний лічильник GAMA 100 (модель G1B 154)

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ

3.1 Аналіз капітальних витрат на впровадження розробленої системи

У межах даної дипломної роботи розроблено систему мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан». Відповідно, метою цього розділу є техніко-економічне

обґрунтування рішення: аналіз капітальних інвестицій, поточних експлуатаційних витрат та розрахунків терміну окупності. Для комплексної оцінки економічної ефективності враховано вартість обладнання та витрати на його сервісне обслуговування протягом 10-річного періоду (з розрахунку 1% від початкової вартості устаткування щорічно).

Капітальні вкладення відображають обсяг фінансування, спрямований на закупівлю та впровадження амортизованих фондів системи. Оскільки ці витрати є базою для розрахунку економічної ефективності, їх повний склад та вартісна оцінка згруповані у таблиці 3.1 згідно з технічними характеристиками системи.

Таблиця 3.1 – Специфікація та обсяг капітальних вкладень у розроблену систему

№	Найменування обладнання та комплектуючих	Кількість, од.	Ціна за од., грн.	Загальна вартість, грн.
1	Euro Wind VS-005 «Тюльпан»	3	25420	76260
2	Гібридний інвертор Ахіота Energy ISMPPT BFP 5000	1	36000	36000
3	Акумуляторна батарея Challenger LiFePO4 48-100	6	40290	241740
4	Пристрій ABP Mezeen MZQ3-2P	1	1958	1958
5	Електронний лічильник GAMA 100 (модель G1B 154)	1	2910	2910
6	Розхідні матеріали та кабелі	-----	6000	4000
Разом:				364868

Обчислення витрат на проведення монтажних та пусконаладжувальних робіт здійснюється за наступною математичною залежністю:

$$K_{MH} = \sum (C_i \cdot a_i \cdot t_i) \cdot K_D \cdot K_{CM} \cdot K_{ПР} , \quad (3.1)$$

де:

C_i – чисельність персоналу відповідної кваліфікації (і-го розряду), залученого до монтажних чи налагоджувальних процесів, чол.;

a_i – встановлена тарифна ставка для спеціаліста даного розряду, грн./год.;

t_i – сумарний час, витрачений на реалізацію вказаного обсягу технічних робіт, год.;

K_d – коефіцієнт (обирається в межах від 1,1 до 1,5), що враховує преміальні виплати, надбавки та інші види доплат;

K_{CM} – фіксований множник, що відповідає за відрахування на соціальне страхування та загальнодержавні програми, його приймають рівним значенню 1,22;

K_{PP} – коефіцієнт, що покриває додаткові непередбачувані або супутні витрати, пов'язані безпосередньо з проведенням робіт, він обирається в межах від 1,1 до 1,5.

Вартість робіт із монтажу та пусконаладження системи визначено згідно з прайсом житомирської компанії ПП «Вінвінбуд», що спеціалізується на відновлюваній енергетиці. З огляду на складність операцій (висотні роботи на щоглі, кріплення турбін та балансування лопатей), погодинна ставка фахівця становить 250 грн./год. Для реалізації проекту залучається бригада з двох спеціалістів, а мінімальні сумарні трудовитрати складають 22 людино-години. Отже, за виразом 3.1 будемо мати, що:

$$K_{MH} = (2 \cdot 250 \cdot 22) \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,5 = 22143 \text{ грн.}$$

Логістичні витрати на транспортування всього необхідного обладнання розробленої системи мікрогенерації житлового будинку на базі ВЕУ типу «тюльпан» розраховані згідно з тарифами транспортної компанії «SAT» (підрозділ м. Житомир).

Вартість доставки 6 вантажних місць загальною масою 0,5 т становить 5745 грн. Дана сума є комплексною та, окрім базового тарифу на перевезення до складу постачальника, включає:

- спеціалізоване дерев'яне пакування (обрештування) для захисту лопатей вітрогенераторів та корпусу інвертора;
- повне страхування високовартісного обладнання;
- послугу «Вантажне таксі» з використанням автомобіля з гідробортом для безпечного вивантаження важких акумуляторів.

Отже, для оцінки фінансової складової проєкту визначимо сукупні капітальні видатки на систему за допомогою виразу:

$$K = K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ТР}} + K_{\text{МН}} , \quad (3.2)$$

де:

$K_{\text{ОБ}}$ – сумарна балансова вартість устаткування без урахування податку на додану вартість, грн.;

$K_{\text{ТР}}$ – логістичні витрати, включаючи доставку та складську обробку, грн.;

$K_{\text{МН}}$ – витрат на проведення монтажних та пусконаладжувальних робіт, грн.

Таким чином, результат обчислень становить:

$$K = 364868 + 5745 + 22143 = 392756 \text{ грн.}$$

Отже, сукупні капітальні інвестиції в розроблену систему складатимуть 392756 грн.

3.2 Оцінка витрат на обслуговування та експлуатацію розробленої системи

Експлуатаційні витрати визначаються як сукупність грошових видатків на утримання та обслуговування розробленої системи протягом розрахункового періоду. Для енергетичного обладнання та електричних мереж структура цих витрат охоплює: амортизаційні відрахування (C_a),

витрати на власні потреби або докуплену електроенергію (C_e), фонд оплати праці з відрахуваннями на соціальні заходи (C_3), а також кошти на технічне обслуговування й планово-попереджувальні ремонти (C_T) та інші операційні витрати ($C_{ін}$). Сукупні річні експлуатаційні витрати обчислюються за формулою:

$$C = C_a + C_e + C_3 + C_T + C_{ін} . \quad (3.3)$$

Запропонована система мікрогенерації на основі вітроустановок «тюльпан» спроектована як повністю автономний вузол енергозабезпечення приватного будинку. Завдяки високому рівню автоматизації, установка не потребує залучення профільного персоналу для моніторингу. Оскільки регламентне обслуговування здійснюється власником власноруч, витрати на оплату праці (C_3) та інші операційні видатки ($C_{ін}$) прирівнюються до нуля.

Величина амортизації обчислюється з огляду на експлуатаційний ресурс системи, її фізичний знос та прогнозовані вигоди від генерації. Для даної установки термін корисного використання становить 10 років. Застосування прямолінійного методу нарахування забезпечує сталу норму амортизації протягом усього життєвого циклу проєкту, що становить:

$$H_a = \frac{K}{K \cdot T_n} \cdot 100\% , \quad (3.4)$$

де:

T_n – розрахунковий період амортизації встановленого обладнання, років;

K – сукупний обсяг капітальних вкладень у створення системи, грн.

Таким чином, щорічна норма амортизаційних відрахувань для запропонованої системи енергозабезпечення становитиме:

$$H_a = \frac{392756}{392756 \cdot 10} \cdot 100\% = 10 \% .$$

Далі розрахуємо обсяг щорічних амортизаційних відрахувань за виразом:

$$C_a = \frac{K \cdot H_a}{100}, \quad (3.5)$$

де:

H_a – річна норма амортизаційних відрахувань, %.

Отримаємо:

$$C_a = \frac{392756 \cdot 10}{100} = 39275,6 \text{ грн.}$$

Для розрахунку щорічних видатків на технічне обслуговування та поточний ремонт (ТО та ПР) системи враховуються витрати на комплектуючі, змінні деталі та оплату ремонтних робіт. Згідно з галузевими нормативами для вітроенергетичних установок, ці витрати приймаються на рівні 1% від сукупних капітальних інвестицій:

$$C_T = 0,01 \cdot K. \quad (3.6)$$

Отримаємо:

$$C_T = 0,01 \cdot 392756 = 3927,56 \text{ грн.}$$

Отже, підсумкове значення річних експлуатаційних витрат системи за формулою 3.3 становить:

$$C = 39275,6 + 0 + 0 + 3927,56 = 43203,16 \text{ грн.}$$

3.3 Визначення періоду окупності розробленої системи

Застосування рішень у сфері мікрогенерації на базі відновлюваних джерел енергії супроводжується високою капіталомісткістю на етапі впровадження, що, однак, нівелюється мінімальними операційними витратами в процесі експлуатації. Це зумовлює необхідність детального розрахунку терміну окупності первинних інвестицій. У межах даної роботи розроблено гібридну (автономно-мережеву) систему, функціонал якої передбачає енергозабезпечення побутових споживачів, заряджання акумуляторних модулів та передачу надлишкової потужності в загальну електромережу. Економічна доцільність проєкту підкріплюється державним стимулюванням у формі «зеленого» тарифу. Відповідно до нормативно-правової бази (Закон №514-VIII та постанова НКРЕКП №725), з 1 січня 2026 року розрахункова ставка для таких систем становить 0,132-0,135 євро (орієнтовно 5,88 грн./кВт·год. без ПДВ).

Для обчислення річної кількості електроенергії, що генерується системою, скористаємося наступним математичним виразом:

$$W = N_{VS-005_сер."букет"} \cdot n_{тижнів} \quad (3.7)$$

де:

W – річний виробіток електроенергії розробленою системою мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан», кВт·год.;

$n_{тижнів}$ – кількість розрахункових тижнів у році, од.;

$N_{VS-005_сер."букет"}$ – середньорічний тижневий енерговиробіток обраних моделей вітрогенераторів за умови їх кластерного об'єднання у «букет», Вт·год.

Отже, отримаємо, що:

$$W = 71487,4 \cdot 52 = 3717344,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.} \approx 3717,35 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Таким чином, економічний ефект за рік від впровадження розробленої системи в даній дипломній роботі системи складе:

$$Y_{\text{розробленої системи}} = 5,88 \text{ грн} \cdot W, \quad (3.8)$$

де:

$Y_{\text{розробленої системи}}$ — економічний ефект за рік від розробленої системи мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «тюльпан», грн.

Таким чином, результат складе:

$$Y_{\text{розробленої системи}} = 5,88 \text{ грн} \cdot 3717,35 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 21858,02 \text{ грн}.$$

Обґрунтування періоду окупності розробленої системи мікрогенерації на базі вітроустановок «тюльпан» проведемо за допомогою наступної залежності:

$$T = \frac{K}{Y_{\text{розробленої системи}}}, \quad (3.9)$$

Отже, значення складе:

$$T = \frac{392756}{21858,02} = 18 \text{ років.}$$

4 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

4.1 Організація безпечного виконання робіт під час встановлення та обслуговування вітрогенераторів типу «тюльпан»

Конструктивні параметри установок типу «тюльпан» – зокрема вертикальна орієнтація валу, низьке розташування лопатевої системи та значний момент інерції ротора – визначають специфічний підхід до організації безпеки.

Першочерговим завданням при підготовці до монтажу є моніторинг погодних умов. Завдяки пелюстковій формі ротора, конструкція демонструє

високу вітрову чутливість незалежно від вектора повітряних потоків. До основних типів монтажних пусконаладжувальних робіт відносять:

- метеорологічний контроль: проведення будь-яких операцій із підйому та фіксації елементів ВЕУ при поривах вітру понад 10-12 м/с суворо заборонено;
- фіксація ротора: до завершення анкерного кріплення та налаштування гальмівних систем рухома частина повинна бути надійно заблокована спеціальним стопорним пристроєм; це усуває ризик самовільного обертання, що загрожує травмуванням персоналу чи пошкодженням техніки;
- статична стійкість: через підвищені динамічні вібрації, притаманні вертикальним турбінам, критично важливим є контроль зусилля зтяжки з'єднань щогли та фундаменту.

Основним фактором ризику для моделей «тюльпан» є робоча зона лопатей, яка часто збігається з рівнем перебування персоналу або площиною покрівлі.

Для недопущення сторонніх осіб у радіус дії турбіни встановлюється периметральне огороження або маркування, що виходить за межі вильоту лопатей мінімум на один метр.

Перед початком сервісних процедур застосовується поетапне гальмування: спершу задіюється електромагнітне гальмо контролера, а після – механічна фіксація. З огляду на значну масу ротора, допуск до вузлів дозволяється лише після повної зупинки обертання.

Оскільки генераторний вузол зазвичай знаходиться в нижній точці конструкції, особлива увага приділяється захисту від вологи та перевірці контуру заземлення для зняття статичного заряду, що виникає при терті лопатей об повітря.

Специфічним аспектом обслуговування «тюльпанів» є боротьба з резонансними явищами. Періодична інспекція (не рідше 1-2 разів на рік) повинна включати перевірку цілісності зварних конструкцій та контроль

надійності болтових кріплень. У холодну пору року слід враховувати, що траєкторія розльоту льоду в таких установках має круговий характер, що вимагає розширення безпечної дистанції навколо об'єкта.

4.2 Організація протипожежної безпеки при експлуатації вітрогенераторів типу «тюльпан»

Комплекс заходів із пожежної безпеки для вітрогенераторів вертикального типу базується на специфіці їхньої конструкції: компактному розміщенні електротехнічних вузлів та особливостях аеродинаміки ротора. Основна стратегія захисту поєднує автоматизований моніторинг, інженерні рішення та регламентований порядок дій персоналу.

Особливу увагу при експлуатації моделей «Тюльпан» слід приділяти наступним факторам ризику:

- термічне навантаження: тертя в підшипникових вузлах головного валу при недостатній змазці або перекосах конструкції;
- електротехнічні збої: перевантаження обмоток генератора, дефекти в силових кабелях або критичні помилки в роботі інверторного обладнання;
- зовнішні чинники: накопичення статичної напруги на «пелюстках» ротора під час сухого вітру та прямі влучання блискавки в металеву щоглу.

Для запобігання пожежам на ранніх стадіях в архітектуру вітрогенератора впроваджено комплекс інженерних систем, що базується на активному моніторингу та пасивному захисті. Безпека експлуатації забезпечується встановленням високочутливих датчиків термоконтролю на генераторі та опорних вузлах, які при досягненні температури понад 75°C автоматично ініціюють аварійну зупинку ротора (тригер «Stop-Mode») та розмикають ланцюг живлення.

Оскільки конструкція «тюльпана» є масивною металевою спорудою, вона обов'язково обладнується контуром заземлення з опором не більше 4 Ом, а для ефективного відведення статичного заряду з рухомих частин ротора на нерухому опору використовуються спеціальні струмознімальні щітки. Додатковий рівень безпеки гарантує система пасивного захисту, що передбачає використання виключно вогнетривких кабелів із низьким рівнем димовиділення та герметизацію всіх технологічних отворів спеціалізованими вогнезахисними мастиками.

Через низьке розташування основних вузлів вітрогенератора «тюльпан», процес пожежогасіння є максимально доступним, але потребує суворого дотримання алгоритму. Біля основи установки обов'язково розміщують вуглекислотні (ВВ) або порошкові (ВП) вогнегасники; використання води чи піни для гасіння електроустановок заборонено. У разі задимлення необхідно негайно знеструмити систему, заблокувати ротор механічним гальмом та локалізувати вогонь вуглекислотним вогнегасником.

Для профілактики раз на півроку проводиться перевірка контактів, очищення вузлів від пилу й мастила, а також дефектоскопія блискавкозахисту перед грозовим сезоном.

ВИСНОВКИ

У межах дипломної роботи розроблено автономно-мережеву систему мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно-ефективних вітротурбін типу «Тюльпан». На основі аналізу середньодобового енергоспоживання об'єкта та аеродинамічних розрахунків проведено вибір моделі, кількості турбін, а також підбір ключового обладнання: інвертора, акумуляторних батарей, блоку АВР і вузла обліку за «зеленим тарифом».

Вибір вертикально-осьової конструкції зумовлений її перевагами в умовах житлової забудови: низьким порогом пускової швидкості, здатністю

працювати при зміні напрямку вітру без систем орієнтації, а також мінімальним рівнем шуму та вібрацій.

Водночас дослідження економічної ефективності показало, що розрахунковий термін окупності проєкту становить 18 років. Це зумовлено нижчим коефіцієнтом використання енергії вітру порівняно з промисловими установками та кубічною залежністю потужності від швидкості вітру ($P \propto v^3$). У зоні турбулентних потоків житлової забудови це призводить до зниження виробітку енергії, що на тлі високої питомої вартості обладнання обмежує швидку комерційну окупність.

Проте реалізація такої системи є стратегічно виправданою для забезпечення енергетичної автономності приватного житлового будинку. Впровадження вітротурбін типу «тюльпан» дозволяє диверсифікувати джерела живлення, зменшуючи залежність від централізованої електромережі, та забезпечувати базову генерацію в періоди аварійних або планових відключень. Це є критично важливим для стабільного та незалежного енергозабезпечення сучасного домоволодіння.

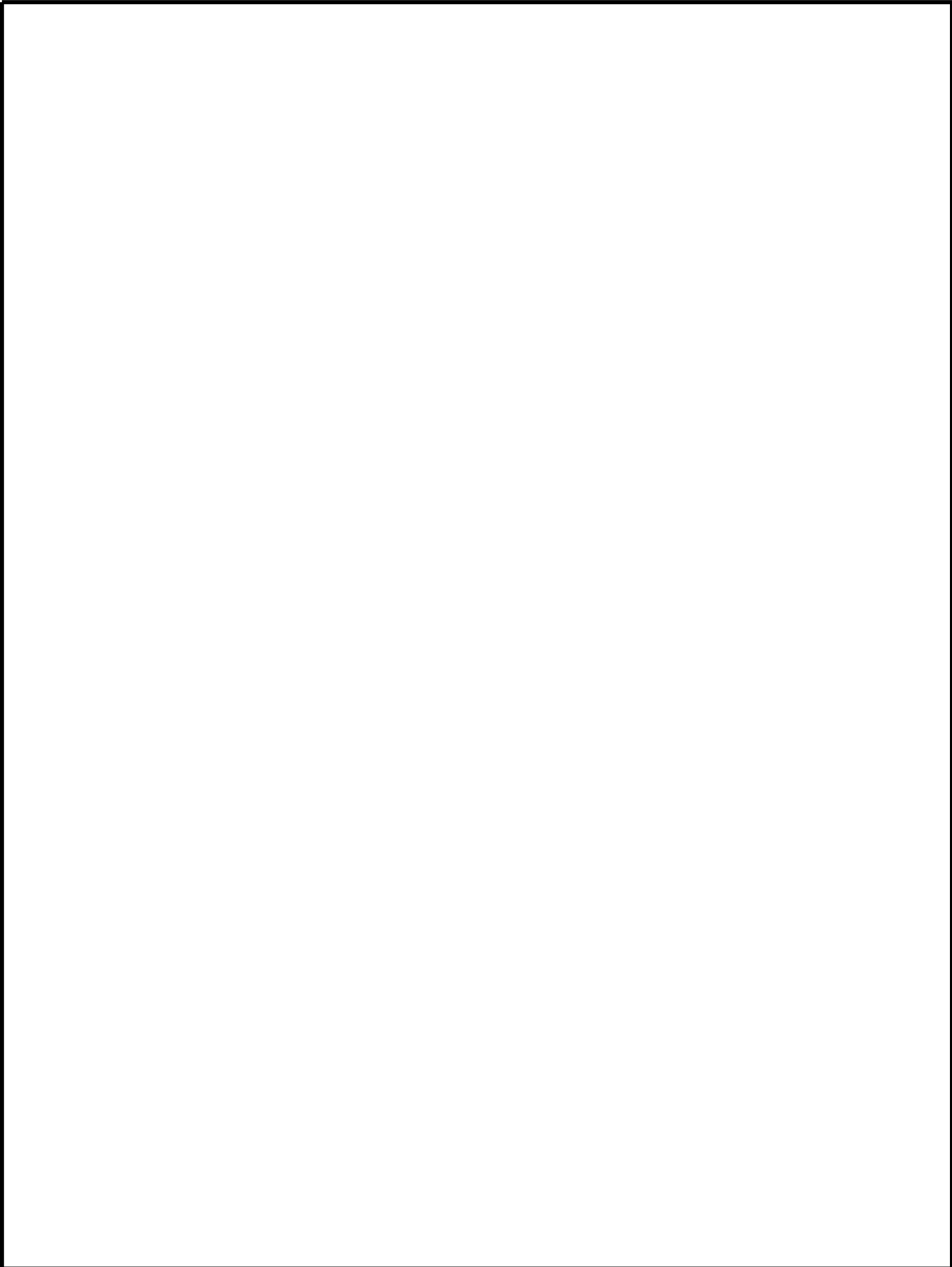
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безпека в вітроенергетиці. Ч. 1. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/безпека-в-вітроенергетиці-частина-1-anastasiia-oliinyk>
2. Головка В. М. та ін. Підвищення потужності генератора вітроустановки за рахунок зменшення повітряного проміжку між статором і ротором / В. М. Головка, Є. М. Дубчак, О. Ю. Заморока // Відновлювальна енергетика : наук. журнал. 2020. № 1. С. 36-41.

3. Електроенергія з енергії вітру для вашої родини. URL:
https://cg.gov.ua/web_docs/1/2019/01/docs/Power_from_wind_ua.pdf
4. Енергетичні установки на основі використання енергії вітру // Відновлювальна енергетика навч. посібник / В. М. Синглазов, О. А. Зеленков, Ш. І. Аскеров, Б. І. Дмитренко. Київ : Освіта України, 2015. С. 44-130.
5. Інструкція з монтажу та використання вітрогенератора Х-типу. URL:
https://sealing.com.ua/wa-data/public/site/docs/R&X-Energy_Manual_X-type.pdf?v58
6. Комплекси генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення : монографія / І. А. Шаповал, В. М. Михальський, М. Ю. Артеменко [та ін.]. Київ : Ін
7. Лесько В. О. та ін. Оцінка ефективності вітрогенераторів в реальних умовах з додатковими експлуатаційними витратами / В. О. Лесько, К. Б. Покровський, Р. Я. Ференсович // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 6. С. 37
8. Медвідь А. М., Панченко А. О. Зменшення негативного впливу на довкілля за рахунок використання вітродвигуна коливального руху // Актуальні проблеми енергетики та екології : зб. наук. праць за мат. XVIII Всеукр. наук.-практ. онлайн-конф. (29-30 вер. 2020 року). Одеса : Бондаренко М. О., 2020. С. 72-77.
9. Вітроенергетика : монографія / за ред. С. О. Кудрі. Київ : ІВЕ, 2023. 137 с.
10. Основи будівництва під вітрогенератори. Використання вітрогенераторів: майбутнє енергетики. URL:
<https://enco.com.ua/stati/osnovi-budivnitstva-pid-vitrogeneratori/>
11. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. Дніпропетровськ : НГУ, 2015. 337 с.

12. Особливості проектів вітроенергетики та специфіка управління ними / Т. А. Воркут, А. В. Севостьянова // [Вісник Черкаського державного технологічного університету](#). 2019. № 2. С. 86-95.
13. Розробка моделі домашнього стаціонарного вертикального вітрогенератора / І. І. Сілі, О. Ю. Азархов, Н. А. Бухлал, В. О. Петров // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2020. Вип. 10, т. 2. С. 1-8.
14. Савчук М. Розвиток малої та середньої вітрогенерації в Україні. Використання комбінованих систем. Київ : Українська вітроенергетична асоціація, 2019. 34 с. URL: http://uwea.com.ua/uploads/docs/Gresa_Group_9-6.11.2019.pdf

<i>Познач.</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кіл.</i>	<i>Примітка</i>
	<i>Напівпровідникові діоди</i>		
<i>VD1...18</i>	<i>1N4007</i>	<i>18</i>	
<i>VD19...22</i>	<i>UF10-01</i>	<i>4</i>	
<i>VD23</i>	<i>UF4007</i>	<i>1</i>	
<i>VD24, 26</i>	<i>світлодіод «LED»</i>	<i>2</i>	<i>зелений</i>
<i>VD25</i>	<i>світлодіод «LED»</i>	<i>1</i>	<i>червоний</i>
<i>VD27...30</i>	<i>FR107</i>	<i>4</i>	
<i>VD31</i>	<i>1N4004</i>	<i>1</i>	
<i>VD32</i>	<i>TL431</i>	<i>1</i>	
	<i>Інтегральні мікросхеми та мікроконтролери</i>		
<i>DA1</i>	<i>Arduino UNO</i>	<i>1</i>	
<i>DA2</i>	<i>Hitachi HD 44780</i>	<i>1</i>	
<i>DA3</i>	<i>LM2576/5.0</i>	<i>1</i>	
<i>DA4</i>	<i>IR2153</i>	<i>1</i>	
<i>DA5</i>	<i>PC817</i>	<i>1</i>	
	<i>Транзистори</i>		
<i>VT1</i>	<i>F9540N</i>	<i>1</i>	<i>польовий</i>
<i>VT2</i>	<i>C945</i>	<i>1</i>	<i>біполярний</i>
<i>VT3, VT4</i>	<i>IRF3205</i>	<i>2</i>	<i>польовий</i>
	<i>Конденсатори</i>		
<i>C1</i>	<i>220 мкФ</i>	<i>1</i>	<i>50В</i>
<i>C2</i>	<i>100нФ</i>	<i>1</i>	
<i>C3</i>	<i>1000 мкФ</i>	<i>1</i>	<i>16В</i>
<i>C4</i>	<i>220 мкФ</i>	<i>1</i>	<i>36В</i>
<i>C5</i>	<i>1 мкФ</i>	<i>1</i>	
<i>C6</i>	<i>100 мкФ</i>	<i>1</i>	
<i>C7</i>	<i>6,8 нФ</i>	<i>1</i>	
<i>C8</i>	<i>10 нФ</i>	<i>1</i>	



					БР.141.004.002.ПЗ					
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	Перелік елементів. Схема електрична принципова. Система мікрогенерації для житлового будинку на базі аеродинамічно- ефективних вітротурбін типу «тюльпан» (ДОДАТОК А)	Літ.		Арк.	Аркушів	
Розробив	Повар О.П.					У		71	72	
Перевір	Сазонов А.Ю.									
Н. Контр.	Антипчук Б.О.					ЖАТФК, Гр. БЕЗ-4стн				
Затв.	Насінник І.І.									

[illegible]

