

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Пояснювальна записка

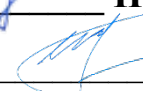
до дипломного проекту (роботи)

бакалавра

на тему:

**«Розробка вітрогенераторної установки потужністю 10 кВт для автономного
живлення домогосподарства»**

Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ 2022-1
спеціальності 141 – *Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії)*

 **П.С. Ільїнський**
Керівник  **О. Б. Єгоров**

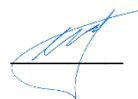
Рецензент  **М. Л. Глєбова**

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
завідувач кафедри АЕЕ

 доц. **О.Б. Єгоров**

“ 14 ” 06 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ
Ільїнському Павлу Сергійовичу

1. Тема проєкту: «Розробка вітрогенераторної установки потужністю 10 кВт для автономного живлення домогосподарства»»

керівник проєкту Єгоров Олексій Борисович, к.т.н., доцент
затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05. 2026 року № 440-03.

2. Строк подання студентом проєкту 14 червня 2026 року.

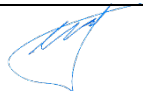
3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Дані режимів роботи генераторів, та його характеристики, ДСТУ 2843-94, ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні, Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз конструктивних особливостей вітрогенераторів та їх сфера застосування; Визначення навантаження, оцінка вітроенергетичного потенціалу; Вибір та аеродинамічний розрахунок вітрогенератора; Вибір електрогенератора та додаткового обладнання системи; Виконання монтажу вітрогенератора; Математичне моделювання генератора в ANSYS Maxwell; Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
1) Цілі та завдання проєктування. 2) Конструкції вітрогенераторів з вертикальною

та горизонтальною віссю обертання. 3) Класифікація вітродвигунів за віссю обертання. 4) Генеральний план ділянки котеджу, роза вітрів та характеристика погодинного навантаження проєкту. 5). Критична група навантаження котеджу. 6) Характеристика обраного вітрогенератора, крива потужності та аеродинамічний профіль лопаті. 7) Обладнання автономної ВЕУ, план ділянки з розміщенням ВЕУ, кабельною трасою та контуром заземлення, план кріплення опори до фундаменту. 8) Результати моделювання генератора у програмі ANSYS Maxwell: 2D та 3D модель генератора, тривимірна модель ротора, розкладка провідників по пазах, розподіл магнітної індукції. 9) Результати моделювання генератора у програмі ANSYS Maxwell: графіки індукції в повітряному зазорі, фазних напруг та струмів, струми у фазах, момент обертання ротора, ККД генератора. 10) Висновки.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Єгоров О.Б., доц. каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я. О., доцент каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз автономних генераторів	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Аналіз конструкцій вітрогенераторів, Розрахунок параметрів вітроенергетичної установки. Математичне моделювання ВЕУ	31.05.2026-05.06. 2026	
3	Розробка заходів з охорони праці	07.06.2026-10.06. 2026	
4	Підготовка та подання дипломного проєкту до захисту.	11.06. 2026-14.06. 2026	

Студент  Ільїнський П.С.

Керівник роботи  О.Б. Єгоров.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота бакалавра складається з 95 сторінок пояснювальної записки, 5 розділів, 43 рисунків, 18 таблиць, 1 додатка, 11 аркушів графічної частини, 47 найменувань використаних джерел інформації.

Мета роботи – розробка вітроенергетичної установки потужністю 10 кВт для автономного живлення критичного обладнання котеджу, розташованого в с. Фонтанка на узбережжі Чорного моря Одеської області.

В роботі проведено аналіз конструкцій вітрогенераторів та їх класифікацію, розрахунок електричних навантажень котеджу методом коефіцієнта попиту з визначенням пікового навантаження та добового споживання, оцінку вітроенергетичного потенціалу локації, вибір та аеродинамічний розрахунок горизонтально-осьового вітрогенератора, проектування синхронного генератора на постійних магнітах з визначенням його головних розмірів, підбір допоміжного обладнання автономної системи, а саме: гібридного інвертора, контролера заряду та акумуляторного блоку з загальною ємністю 1500 А·год.

Розрахунки, що були проведені в роботі, перевірені в програмі ANSYS Maxwell. У програмному комплексі реалізовано двовимірне та тривимірне моделювання генератора, а також досліджено розподіл магнітної індукції, фазних та лінійних напруг, струмів і крутного моменту в номінальному режимі.

У заключному п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці при обслуговуванні електроустановок автономної ВЕУ до 1000 В.

Ключові слова: вітроенергетична установка, горизонтально-осьовий вітрогенератор, синхронний генератор на постійних магнітах, автономне електропостачання, акумуляторна батарея, гібридний інвертор, ANSYS Maxwell, охорона праці.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ	8
1.1 Конструктивні особливості вітрогенераторів та сфера застосування	8
1.2 Висновки до першого розділу.....	17
2. ВИБІР ОБ'ЄКТУ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	18
2.1 Аналіз споживачів домогосподарства.....	18
2.2 Розрахунок потужності, що споживається об'єктом.....	21
2.3 Висновки до другого розділу	25
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ .	26
3.1 Оцінка вітроенергетичного потенціалу	26
3.2 Вибір вітрогенератора	29
3.3 Аеродинамічні параметри ВЕУ	33
3.4 Вибір електрогенератора	36
3.5 Вибір додаткового обладнання для вітроенергетичної установки	44
3.6 Монтаж вітрогенератора	50
3.7. Технічні характеристики ВЕУ	54
3.8 Аналіз результатів розрахунку характеристик ВЕУ	55
3.9 Висновки до третього розділу.....	56
4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕУ	57
4.1 Моделювання генератора ВЕУ в ANSYS Maxwell.....	57
4.2 Висновки до четвертого розділу.....	62
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	64
5.1 Загальні положення з охорони праці при обслуговуванні вітроенергетичної	

установки.....	64
5.2 Характеристика електроустановки автономної ВЕУ	67
5.3 Аналіз небезпечних факторів з акцентом на ураження електричним струмом при виконанні електротехнічних робіт	68
5.4 Технічні заходи електробезпеки.....	72
5.5 Засоби індивідуального захисту	77
5.6 Пожежна безпека автономної вітроенергетичної установки.....	79
5.8 Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом	82
5.9 Висновки до п'ятого розділу.....	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86
ДОДАТОК А	91

ВСТУП

Вітер як джерело енергії відомий людству значно довше ніж електрика. Перші вітряні млини з'явилися у Персії ще в VII столітті і використовували їх для помелу зерна та підйому води. Через кілька століть технологія поширилась на Близький Схід, а потім і на Європу. Голландські вітряки стали символом цілої епохи. Ними осушували болота, пиляли деревину та давали механічну енергію там, де іншої енергії просто не існувало. З приходом парової машини і двигуна внутрішнього згорання вітер поступово відійшов на другий план [1].

Повернення інтересу до енергії вітру відбулось у другій половині XX століття на тлі нафтових криз. Але тоді вітроенергетика залишилась виключно промисловою справою з масивними турбінами висотою у сотні метрів та вітропарками на тисячі гектар. Звичайний домовласник міг лише споглядати за цими велетнями з відстані.

Останні десятиліття технології стрімко розвиваються і разом із промисловими гігантами на ринку з'явився клас малопотужних установок. За компактні розміри, доступну вартість вони швидко стали популярними серед приватних домогосподарств, фермерських угідь, невеликих підприємств. Прибережні та відкриті території з великим вітровим потенціалом перетворились на перспективні майданчики для таких установок.

Україна з своїми узбережжями Чорного та Азовських морів, степових рівнин півдня придатна для малої розподіленої генерації [2]. Останні події додали ще один аргумент на користь володіння власним джерелом енергії. Аварійні графіки відключень та вразливість мережі змусили власників будинків шукати незалежні рішення.

Саме в контексті пошуку альтернативи мережевому живленню розробляється автономна мала вітроенергетична система для котеджу.

1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

1.1 Конструктивні особливості вітрогенераторів та сфера застосування

Головним завданням вітроенергетики є ефективне перетворення кінетичної енергії повітряних мас у механічну або електричну енергію. Потужним потоком кінетичної енергії є вітер, який виникає в результаті нерівномірного нагрівання. Різний кут падіння сонячних променів на різних широтах (найвища інтенсивність спостерігається біля екватора і поступово спадає до полюсів), а також різниця між теплоємністю суходолу та водних мас Землі призводить до утворення в атмосфері підвищених та знижених зон атмосферного тиску. Ця різниця спрямовує повітря з зони високого тиску до зони низької. Саме такий рух повітря ми й називаємо вітром.

Щоб забрати частину енергії у повітряного потоку та перетворити її у бажану енергію, людство віднайшло вітрогенератор. Це технічний пристрій (двигун), який здатний вловлювати кінетичну енергію вітру за допомогою спеціально спрофільованих лопатей. Сучасна вітроенергетична установка складається з таких основних елементів:

- ротор або вітроколесо – взаємодіє з вітровим потоком. Складається з лопатей та маточини;
- гондоли – герметичний корпус, розміщений на вершині башти. В ньому зосереджена все основне обладнання: головний вал, редуктор, генератор, гальмівна система;
- башта – несучий конструктивний елемент. За допомогою нього підіймають ротор на визначену висоту, де вітрові потоки є стабільнішими;
- системи керування – комплекс датчиків та механізмів, які забезпечують автоматичний розворот гондоли, регулюють кут нахилу лопатей.

Сучасні вітрогенератори мають низку ознак, за якими їх класифікують. Серед них виокремлюють положення осі обертання, потужність, призначення, частоту

обертання вітроколеса, та місце встановлення [3. с. 123-124].

За положенням осі обертання ВЕУ поділяють на дві основні категорії – вертикально-осьові (рис. 1.1) та горизонтально-осьові (рис. 1.2) ВЕУ.

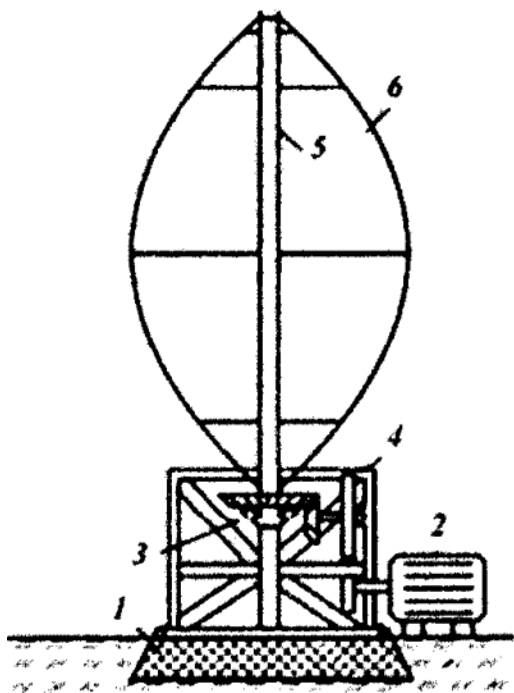


Рисунок 1.1 – Вертикально-осьові ВЕУ: 1 – фундамент, 2 – генератор, 3 – опорний підшипник, 4 – редуктор, 5 – головний вал, 6 – лопаті ротора

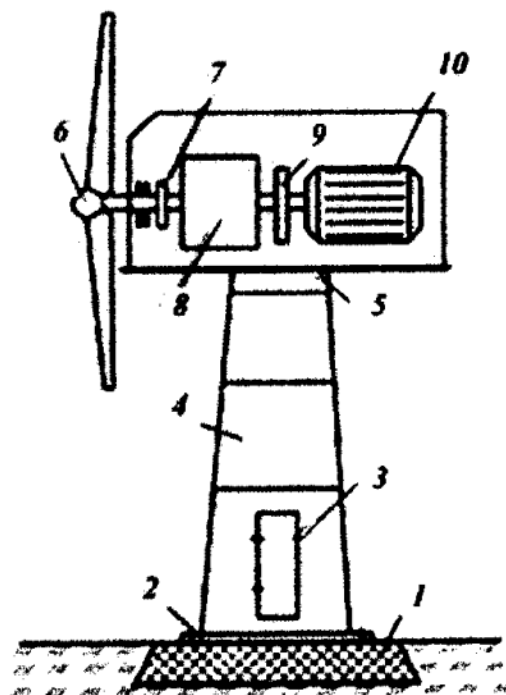


Рисунок 1.2 – Горизонтально-осьові ВЕУ: 1 – фундамент, 2 – опорне кільце, 3 – вхід у башту, 4 – башта з трьома секціями, 5 – поворотне кільце з приводом, 6 – лопатевий ротор, 7 – муфта, 8 – редуктор, 9 – гальмівний диск, 10 – генератор

Як зрозуміло з назви, вертикально-осьові генератори мають вісь обертання перпендикулярно до землі, а лопаті обертаються навколо неї за принципом каруселі. За такого робочого положення вони здатні приймати вітер за будь-якого напрямку без необхідності встановлення механізмів орієнтації. Інженерною перевагою в обслуговуванні є компонування обладнання. Генератор, редуктор та опорні підшипники розташовуються близько до землі.

На рисунку 1.3 наведені ілюстрації різних конструкцій вітрогенераторів з

вертикальною та горизонтальною віссю [4, с. 76].

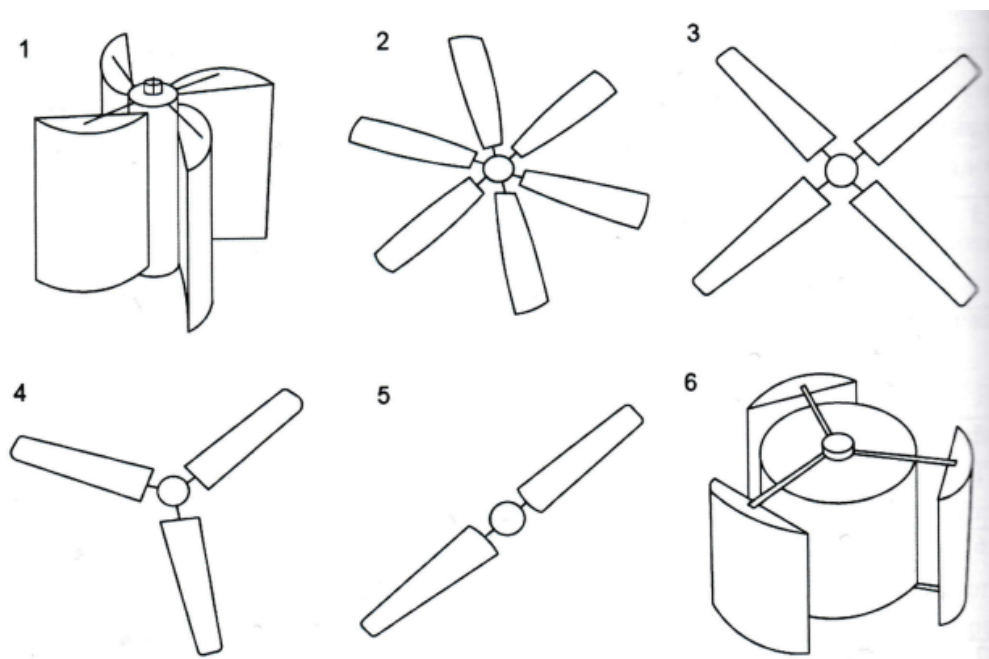


Рисунок 1.3 – Класифікація вітродвигунів за орієнтацією осі обертання:

1,6 – вертикально-осьові (карусельні: 1 – лопатеві, 6 – ортогональні);

2-5 – горизонтально-осьові (крильчасті: 2 – багатолопатеві, 3 – чотирилопатеві, 4 – трилопатеві, 5 - дволопатеві)

Серед карусельних установок традиційно виділяють кілька основних типів. Кожен з них має власну геометрію та взаємодію з повітряним потоком.

Найпростішим представником класу карусельних є чашковий ротор. Його робочими елементами є порожні півсфери, встановлені на кінцях поперечних балок. Обертання викликане різницею в опорі: як тільки повітря вдаряє у вигнуту сторону однієї чашки, на опуклу сторону іншої давить значно більший тиск. ККД пристрою є дуже низьким для вироблення електроенергії. Тому чашковий ротор використовують у приладах для вимірювання швидкості вітру – анеометрах.

Більш практичним є ротор Савоніуса. Конструктивно він складається з двох напівциліндричних лопатей, спеціально зміщених одна відносно одної, щоб утворити зазор. Через цей зазор проходить повітря. Принцип роботи також базується на різниці в опорі, але потік частково спрямовується через зазор і тисне на задній край сусідньої лопаті. Тому ротор Савоніуса має високий пусковий

крутний момент і почитає обертатися навіть при слабкому повітрі. Його швидкість обертання відносно мала, але стабільна. Такі ротори придатні для роботи водяних насосів або вентиляційних систем.

Ротор Дар'є працює за іншим принципом. Його лопаті мають аеродинамічний профіль. Вони встановлені вертикально між верхньою та нижньою опорами. Коли відбувається рух в потоці, на лопатях створюється підйомна сила, яка обертає ротор. Якщо порівнювати з Савоніусом, лопаті ротора Дар'є можуть рухатися в кілька разів швидше за повітря, а ККД близький до показників горизонтальних турбін. Сам ротор має погану здатність до самозапуску, тому, як правило, для запуску використовують допоміжний двигун чи комбінацію з ротором Савоніуса.

Конструктивні відмінності між описаними типами вітрогенераторів з вертикальною віссю показані на рисунку 1.4 [5, с. 109].

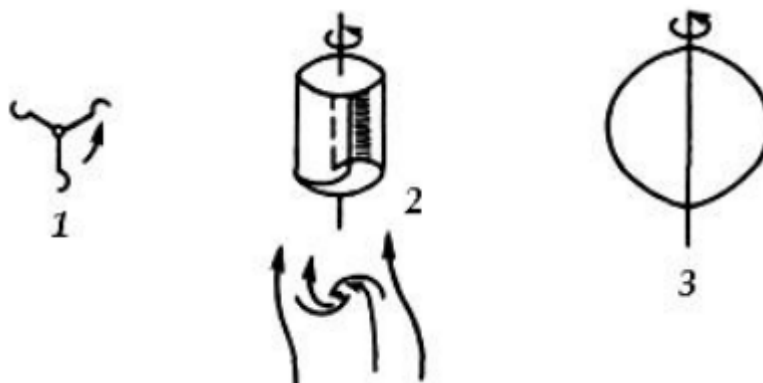


Рисунок 1.4 – Різновиди вертикально-осьових вітроколес: 1 – чашковий; 2 – ротор Савоніуса; 3 – ротор Дар'є

ВЕУ з горизонтальною віссю взаємодіють з потоком вітру за іншим принципом. Їх ротор має вигляд гвинта, який встановлений на високій щоглі. Обертання відбувається перпендикулярно до напрямку вітрового потоку. Важливо, щоб гондола залишалась вирівняною щодо вітру. Керування повороту відбувається за датчиком напрямку вітру. Вартість такої конструкції набагато більша, але виправдана. Підняття ротора на значну висоту дозволяє працювати в зоні більш

стабільного повітряного потоку.

Лопаті турбін з горизонтальною віссю обертання виготовляються з композитних матеріалів на основі скло- або вуглецевого волокна. Використання таких матеріалів дозволяє зменшити масу лопатей, але зробити їх міцними [6].

Потужність таких вітрогенераторів вимірюється в мегаватах, а діаметр ротора найбільших моделей перевищує розмах крил найбільшого пасажирського літака. Для їх встановлення потрібна важка підйомна техніка, спеціальні транспортувальні платформи та кваліфікований персонал.

Кожна з конструкцій має свої сфери застосування. ВЕУ горизонтальною віссю обертання залишається єдиним варіантом для промислового виробництва вітроенергетики в мегаватному масштабі. Машини з вертикальною віссю обертання почали поступово завойовувати позиції в сфері малої розділеної енергетики, міської забудови та гібридних систем.

Вітроенергетичні установки різняться між собою не лише геометрією ротора, але й за величиною потужності. Діапазон цього показника варіюється від кількох сотень ват до десятків мегават. Залежно від номінальної потужності ВЕУ поділяються на кілька класів (табл. 1.1) [1].

Таблиця 1.1 – Класифікація ВЕУ за потужністю

Клас потужності	Потужність, кВт	Діаметр ротора, м	Кількість лопатей	Призначення
1	2	3	4	5
Малопотужні	до 100	3-10	2-3	Побутові потреби, заряджання акумуляторів приватні домогосподарства
Середньої потужності	100-1000	25-44	2-3	Локальні мережі, невеликі підприємства
Великої потужності	більше 1000	Більше 45	2	Промислові ВЕС, морські вітропарки

За частотою обертання вітроколеса класифікують установки з постійною або змінною швидкістю обертання. У першому випадку кутова швидкість ротора підтримується на постійному рівні. Використовуються такі системи у складі потужних енергосистем. Досягти постійного рівня можливо за допомогою жорсткого зв'язку між генератором і мережею або застосуванням синхронних машин із фіксованою кількістю полюсів. Але, якщо відбудеться навіть незначне відхилення швидкості вітру від розрахункової, установка втрачає свою аеродинамічну ефективність. Установки зі змінною частотою обертання орієнтовані передусім на автономну роботу. Ротор адаптується до мінливих умов потоку, тримаючи ККД поблизу максимального значення. Регулювання відбувається завдяки силовим перетворювачам частоти [1].

За призначенням ВЕУ мають два принципово різні напрями використання енергії: використання механічної роботи та виробництво електричного струму. Історично спершу вітрову енергію використовували для обертання млинових коліс, викачування води з колодязів, приведення в дію пилкових рам. У сучасному світі механічні вітрогенератори використовуються для постачання води худобі на віддалених фермах або для зрошування полів, особливо в районах з обмеженою електрифікацією.

Значну ж частку ринку зараз займають вітрогенератори, призначені для виробництва електроенергії. Залежно від способу взаємодії між споживачем та мережею їх поділяють на: мережеві, автономні та гібридні.

Вітрогенератори, які підключені до мережі (мережеві), працюють паралельно з централізованою електромережею. Блок-схема такої системи наведена на рисунку 1.5 [7]. До їх складу входять сам вітрогенератор, контролер заряду та однофазний (або трифазний) синусоїдальний інвертор.

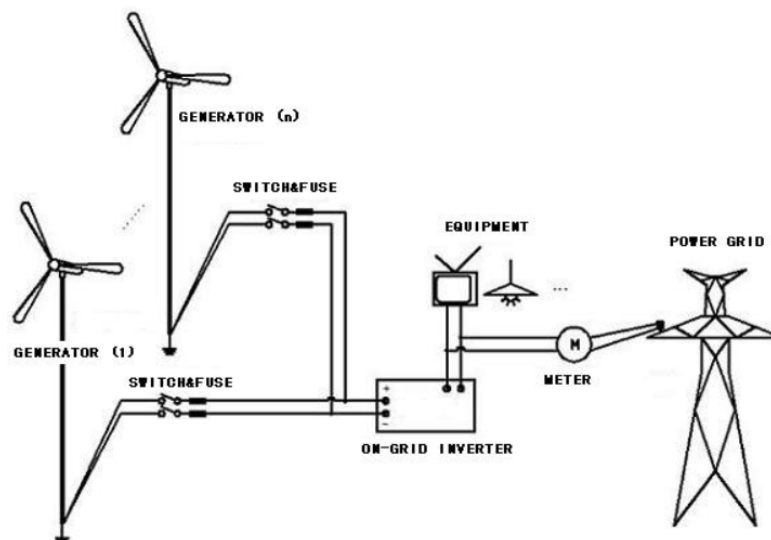


Рисунок 1.5 – Структурна схема мережевої (grid-tied) вітроенергетичної системи

Вітрогенератор виробляє електроенергію, яка інвертором перетворюється на змінний струм. Потім цей струм подається в магістральну лінію електропередачі та на навантаження споживача. В цій системі працює принцип миттєвого споживання виробленої енергії або віддачі її в мережу.

Автономні вітрогенератори працюють лише ізольовано від мережі. Як показано на рисунку 1.6, автономна система, окрім вітрогенератора та контролера, включає акумуляторну батарею [7].

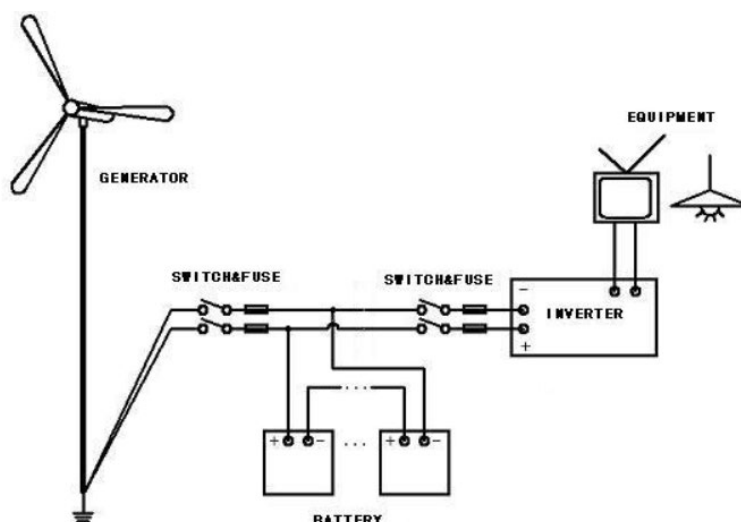


Рисунок 1.6 – Структурна схема автономної (off-grid) вітроенергетичної системи

Вся вироблена електроенергія спочатку використовується для заряду акумуляторних батарей та для закриття потреб споживачів. Для об'єктів, у яких відсутній доступ до центральної мережі, така система є єдиним життєздатним рішенням. Це компенсує високу вартість акумуляторних батарей.

Гібридна система ВЕУ поєднує характеристики двох попередніх типів. Вона дозволяє вироблену енергію використовувати для власного споживання, накопичувати їх у акумуляторах, і, за необхідності, віддавати в мережу. Керування енергетичними потоками здійснює гібридний інвертор. За надлишку генерації він спрямовує вироблену енергію на заряд акумуляторів, а після передає до мережі. Якщо виробіток живлення знизився, то він починає споживати енергію з акумуляторів, а після їх розряду – з електромережі.

Окремо варто віднести автономні вітрові освітлювальні системи. Таке рішення використовуються у містах та селах, щоб освітити дороги, двори, рекламні конструкції тощо. Система складається з вітрогенератора, контролера, опори для освітлення, світильника та АКБ. Приклад інтеграції автономної вітрової системи в міське середовище наведено на рисунку 1.7 [7].



Рисунок 1.7 – Приклад інтеграції автономної вітрової освітлювальної системи

Вітрогенератори сьогодні можна побачити в найрізноманітніших ландшафтах. Це результат свідомого вибору місці розташування, який визначає конструкцію фундаменту, логістику постачання та кінцеву вартість проєкту. Одна

й та сама турбіна, змонтована на рівному полі, потребуватиме одного технічного рішення, а встановлена у відкритому морі – зовсім іншого. За місцем встановлення ВЕУ бувають наземні, прибережні та офшорні вітроустановки. Всі вони мають свої особливості щодо вітрових умов, конструктивного виконання та вартості монтажу й обслуговування. Узагальнену порівняльну характеристику приведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. – Порівняльна характеристика місця встановлення ВЕУ

Тип	Розташування	Швидкість вітру	Переваги та недоліки
1	2	3	4
Наземні	Суходіл	Помірна, турбулентна	Переваги: нижча вартість монтажу, проста логістика, легкість в обслуговуванні. Недоліки: обмеження за шумом, менший виробіток.
Середньої потужності	Мілководдя, безпосередня близькість до берега	Підвищення, менш турбулентна	Переваги: кращі вітрові умови, близькість до берегової інфраструктури. Недоліки: вищі витрати на фундамент, складніша логістика.
Великої потужності	Відкрите море	Висока, стабільна	Переваги: максимальний річний виробіток, відсутність обмежень за шумом. Недоліки: значні капітальні витрати, складне обслуговування, корозія.

1.2 Висновки до першого розділу

У розділі 1 було проаналізовано конструктивні особливості сучасних вітрогенераторів, їхню класифікацію та сферу застосування.

Вітер виникає внаслідок нерівномірного нагрівання атмосфери та перепаду тиску. Розглянуто основи перетворення його кінетичної енергії на електричну за допомогою вітрогенераторів.

ВЕУ поділяються за орієнтацією осі обертання, потужністю, частотою обертання, призначенням та місцем встановлення.

Вертикально-осьові моделі (зокрема ротори Савоніуса та Дар'є) здатні приймати вітер будь-якого напрямку без механізмів орієнтації. Використовують їх в умовах міської забудови та систем малої енергетики. Горизонтально-осьові установки, завдяки підняттю ротора на значну висоту, демонструють вищу ефективність у зонах стабільного потоку вітру. Є безальтернативним рішенням для промислової генерації.

Детально опрацьовано класифікації за потужністю та принципом роботи у складі мережевих, автономних і гібридних систем. Вибір типу конструкції беззаперечно залежить від вітрового потенціалу локації, характеру навантаження та зовнішнього середовища.

2. ВИБІР ОБ'ЄКТУ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Аналіз споживачів домогосподарства

Щоб розпочати проєктування автономної ВЕС було проведено аналіз споживачів об'єкта. Сам двоповерховий котедж площею 234 м² був зведений на узбережжі Чорного моря в селі Фонтанка в Одеській області. Локація в межах прибережної смуги формує унікальний мікроклімат, де домінують стабільні та потужні повітряні потоки. За даними [8], Одеська область входить до перспективного південно-східного регіону з колосальним вітроенергетичним потенціалом.

Детальний план опису прилеглої території та розташування будівлі на земельній ділянці представлено на рисунку 2.1.

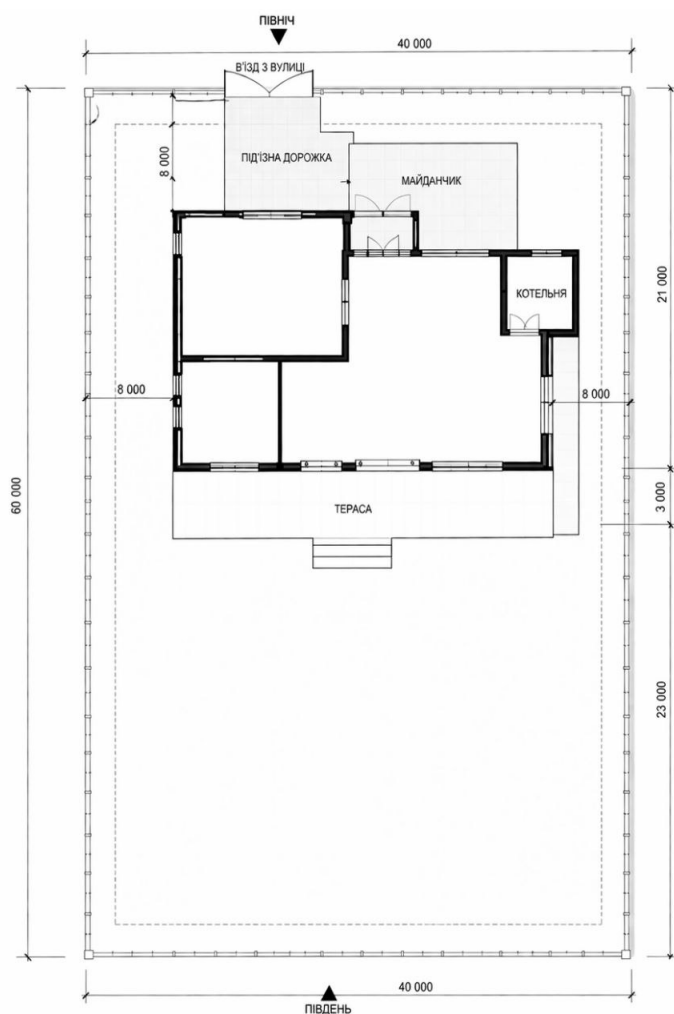


Рисунок 2.1 – Генеральний план ділянки з котеджем

Котедж збудовано відповідно до сучасних стандартів енергоефективності. У структуру технічного наповнення будинку вже інтегровано комплекс передових енергозберігаючих рішень, спрямованих на зниження споживання енергії без жодних компромісів для комфорту мешканців.

Необхідність впровадження автономної вітроенергетичної установки викликана не стільки прагненням до технологічних інновацій, скільки відповіддю на реальні виклики сьогодення. Котедж підключений до зовнішньої мережі через наявний трансформатор. Водночас якість електропостачання у прибережній зоні ненадійне. Особливо перевантаження системи через різке зростання споживачів спостерігається у літній сезон.

Також на рішення щодо побудови вплинула енергетична безпека. Наявність свого джерела запобігає ризикам, пов'язаним з обстрілами енергетичної інфраструктури та постійними графіками відключень. Для будинку з таким енерготехнічним комплексом стабільне живлення є життєво необхідним: зупинка теплового насоса взимку загрожуватиме замерзанням системи опалення, вимикання свердловинного насоса миттєво перериває водопостачання, а мережі колювання напруги здатні вивести з ладу дорогу електроніку.

Усі електроприлади в будинку поділяють на чотири групи. Склад кожної групи наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Таблиця поділу споживачів на групи

Група	Перелік обладнання
1	2
Система життєзабезпечення	Тепловий насос, свердловинний насос, вентиляція з рекуперацією, систем фільтрації води, кондиціонери
Побутова техніка та кухня	Індукційна плита, духовка шафа, холодильник та морозильна камера, посудомийна, пральна, сушильна машини, чайник, мікрохвильова піч

Продовження таблиці 2.1

Освітлення та мультимедіа	Світлодіодне внутрішнє та зовнішнє освітлення, система «Розумний дім», відеоспостереження, мережеве обладнання, телевізори та акустичні системи
Спеціальне обладнання	Зарядна станція для електроавтомобіля, автоматика воріт, автоматичний полив

Лева частина щоденного споживання електроенергії припадає на роботу саме основних побутових приладів життєзабезпечення. Тепловий насос, вентиляція та насосне обладнання формують динамічне, проте контрольоване навантаження завдяки використанню систем плавного пуску. Попит на енергію залежить від сезону, але кожен з них є незмінним елементом у безперебійній роботі механізму будинку.

Побутова техніка та кухонне обладнання вносять у загальний баланс навантаження елемент періодичності. Кухонна та пральна техніка мають епізодичне навантаження, яке можна гнучко підлаштовувати під піки генерації ВЕС. Тоді як дрібні побутові прилади не суттєво впливають на загальний енергетичний баланс.

Освітлювальні та мультимедійні системи мають прогнозований графік роботи з традиційним піком у вечірні години. Використання світлодіодів звело витрати на світло до мінімуму, але цифрова інфраструктура котеджу (система безпеки, відеоспостереження) працює на постійній основі.

Роботу групи спеціалізованого обладнання можна контролювати. Заряджається електромобіль, коли навантаження мінімальне. Система автоматичних воріт працює періодично, а система поливу ще й відповідно до сезону. У разі дефіциту робота цих приладів обмежується в першу чергу.

Ієрархія навантаження котеджу стає фундаментом для вибору оптимально-необхідної потужності обладнання, дозволяючи маневрувати споживанням залежно від мінливості вітрового потоку спроектованої станції.

2.2 Розрахунок потужності, що споживається об'єктом

Великий набір приладів котеджу, створюють ілюзію надмірного навантаження. Але, як було зазначено в аналізі навантаження, більшість обладнання працюють епізодично. Просте сумування характеристик кожного приладу викривляє реальну енергетичну картину, необхідну для коректного вибору параметрів ВЕУ.

Подальший аналіз епізодичності роботи обладнання потребує точного визначення пікового навантаження та добового обсягу спожитої енергії. Отримання достовірних розрахункових величин можливе з використанням методу коефіцієнта попиту. Встановлена потужність відображає виключно суму номіналу потужностей всіх приладів, а розрахункова потужність – фактичне навантаження, яка система забезпечить в піковий момент. Вона враховує ймовірність одночасної роботи обладнання та ступінь завантаженості.

Розрахункову потужність окремого споживача визначають за формулою, наведеної в [9, с. 58]:

$$P_p = P_{вст} \cdot K_{ноп}, \quad (2.1)$$

де $P_{вст}$ – встановлена потужність приладів, кВт;

$K_{ноп}$ – коефіцієнт попиту, в.о.

Усі дані про споживачів, їхні потужності, коефіцієнти попиту та добове споживання наведено в загальну таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Зведена відомість про потужність споживачів котеджу

Найменування	К-сть	$P_{ном},$ кВт	Встановлена потужність, кВт	$K_{ноп},$ в.о.	Розрахункова потужність, кВт	Добове споживання, кВт×год
Тепловий насос	1	3,5	3,5	0,8	2,8	35
Свердловинний насос	1	1,1	1,1	0,2	0,22	1,6
Вентиляція	1	0,35	0,35	1	0,35	8,4
Система фільтрації води	1	0,6	0,6	0,5	0,3	2

Продовження таблиці 2.2

Кондиціонери	3	0,8	2,4	0,4	0,96	4,3
Індукційна плита	1	7,2	7,2	0,2	1,44	3
Духова шафа	1	2,5	2,5	0,2	0,5	1,5
Холодильник та морозильник	2	0,15	0,3	1	0,3	2,8
Посудомийна машина	1	2,1	2,1	0,3	0,63	2,2
Пральна та сушильна машини	2	1,1	2,2	0,1	0,22	2,5
Побутові прилади	-	1,2	1,2	0,1	0,01	0,5
Внутрішнє та зовнішнє освітлення	-	0,7	0,7	0,6	0,45	4,1
Smart Home, CCTV, Інтернет GPON	-	0,15	0,15	1	0,15	0,3
Телевізор та акустика	3	0,25	0,8	0,3	0,23	1
Зарядка електромобіля	1	3,6	3,6	0,2	0,72	14,4
Автоматика та полив	1	0,5	0,5	0,05	0,03	1
Разом			29,2	0,32	9,37	84,6

З аналізу таблиці 2.2 можна зробити висновок, що у завантажений момент одночасно використовується близько третини від 29,2 кВт встановленої потужності всіх приладів. Отримана розрахункова потужність в 9,37 кВт буде виступати основним орієнтиром для проєктування потужності силового обладнання.

Добове споживання електроенергії оцінено на рівні 84,6 кВт×год. Середнє значення навантаження на добу складає:

$$P_{cp} = \frac{E_{доб}}{24}, \quad (2.2)$$

де $E_{доб}$ – добове споживання енергії котеджем, кВт×год.

$$P_{cp} = \frac{84,6}{24} = 3,53 \text{ кВт.}$$

Динаміку зміни навантаження протягом 24-годинного циклу показує побудований графік (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Погодинне навантаження котеджу протягом доби

Графік погодинного навантаження демонструє два чіткі піки. Ранковий припадає на період між 7:00 та 9:00 ранку. Пояснюється поява піку синхронним ввімкненням освітлювальних приладів, кухонної техніки, запуск насоса. Аналогічне зростання і у вечірній час, коли виконуються всі побутові процеси.

У денний час мешканці часто перебувають поза домом, тому навантаження зменшується. Залишається лише обладнання, яке підтримує життєдіяльність і безпеку будівлі. Вночі завантаження також залишається стабільно низьким, крім випадку чотиригодинного періоду, коли електроавтомобіль підзаряджається.

Наведені значення описує повне навантаження котеджу при роботі всіх 4 груп споживачів. З переліку таблиці 2.2 виділено критичну групу завантаження – це споживачі, живлення яких і буде здійснювати вітроенергетична установка. Сюди

відібрані тільки ті прилади, зупинка роботи яких створює реальні незручності. До списку увійшли такі прилади, як тепловий насос, свердловинний насос, вентиляція з рекуперацією, система фільтрації води, холодильник і морозильна камера, інтернет GPON з Wi-Fi роутером та освітлення. Потужність критичної групи становить 4,54 кВт. За день група обладнання споживає 47,9 кВт·год у зимовий та 28,9 кВт·год у літній період.

2.3 Висновки до другого розділу

У розділі 2 виконано оцінювання споживачів котеджу. Сам котедж знаходиться у прибережній зоні Одеської області. Електрообладнання будинку розподілене на чотири функціональні групи. Визначено потужність кожного приладу.

Методом коефіцієнта попиту обчислено пікове навантаження. Розрахункова потужність визначена у 9,37 кВт, добове споживання зафіксовано на рівні 84,6 кВт·год. Ці значення описують повне навантаження котеджу при одночасній роботі всіх груп споживачів.

Робота з погодинним графіком виявив ранковий та вечірній максимум навантаження.

З переліку споживачів виділено критичну групу навантаження з добовим споживанням 47,9 кВт·год у зимовий та 28,9 кВт·год у літній період. Живлення цієї групи здійснюватиме проєктована вітроенергетична установка. Зовнішні мережа залишається основним джерелом для загального навантаження.

3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Оцінка вітроенергетичного потенціалу

Ефективність експлуатації проєктованої вітроенергетичної установки прямо залежить від якості попереднього моніторингу вітрових умов локації. Результати оцінки визначають конфігурацію майбутньої установки, її номінальну потужність та, зрештою, термін окупності проєкту. Базою для отримання кліматичних даних слугувала геоінформаційна платформа Global Wind Atlas [10].

Координати майданчика дозволили отримати зональні вітрові характеристики на розрахунковій висоті 100 м:

- середній показник швидкості 7,1 м/с;
- питома щільність потужності потоку 332 Вт/м².

Розподіл частоти за напрямків повітряних потоків на майданчику ілюструє отримана роза вітрів (рис. 3.1).

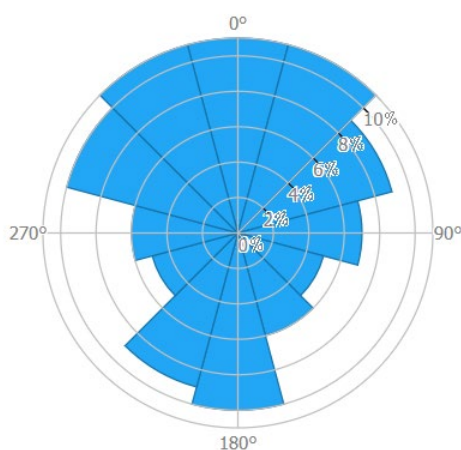


Рисунок 3.1 – Роза вітрів на висоті 100 м (за даними Global Wind Atlas)

переважають вітри з боку материка, а влітку ситуацію змінюють морські бризи з півдня та південного заходу.

Сезонна нерівномірність вітрового потоку представлена графіком місячних змін індексу швидкості вітру на висоті 100 м (рис. 3.2).

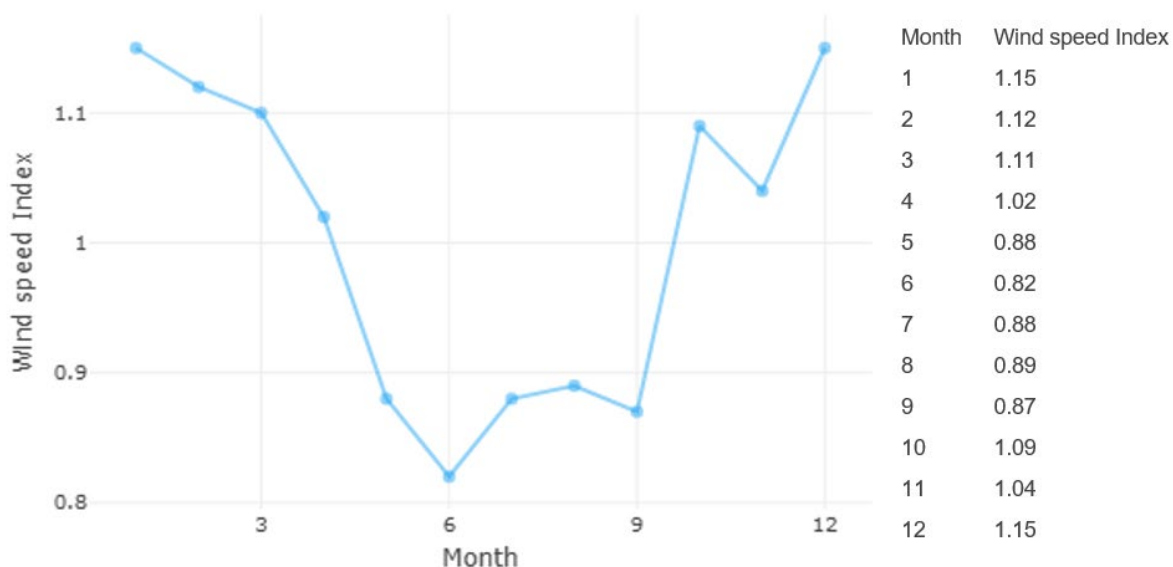


Рисунок 3.2 – Місячний індекс швидкості вітру на висоті 100 м (за даними Global Wind Atlas)

Графік показує виразну циклічність вітрової активності по сезонах. Найвищі показники вітрового потоку фіксуються у період з жовтня по березень. Посилення вітрових мас у ці місяці відбуваються через активну циклонічну діяльність Чорного моря та значною різницею тиску між суходолом і водою. Влітку інтенсивність помірно зменшується, але кінетичного потенціалу потоку все одно достатньо для стабільного захоплення вітру лопатями.

Середня швидкість вітру залежить від висоти та наближено обчислюється за виразом [4, с. 80]:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{0,2} \quad (3.1)$$

де V_1 – середня швидкість вітру на відомій висоті, м/с;

h_2 – висота, на якій визначається швидкість V_2 , м;

h_1 – відома висота, на якій проводилися первинні вимірювання, м.

Достовірність отриманих даних з Global Wind Atlas підтверджуються також нормативними показниками ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія». Багаторічні спостереження метеостанцій в Одеській області фіксували переважання північного (21,4 %), північно-західного (14,1 %) напрямків при частці штилів 2 % [11, табл. 5]. Офіційна метеорологічна статистика збігається з розою вітрів, сформованою цифровим атласом.

Державні вимірювання швидкості отримані на стандартній 10-метровій висоті вимірювання метеостанції. Щоб порівняння з даними атласу було коректним, виконано перерахунок нормативних показників на 100-метрову висоту за формулою (3.1). Дотримуючись положень документа, за базову величину швидкості вітру взято показник $V_1 = 4,5$ м/с на рівні $h_1 = 10$ м. Швидкість вітру на висот $h_2 = 100$ м дорівнює:

$$V_2 = 4,5 \cdot \left(\frac{100}{10}\right)^{0,2} = 7,13 \text{ м.}$$

Отримане розрахункове значення практично збігається з показником цифрового атласу. Перевірені дані з Global Wind Atlas можна надійно використовувати як вихідні параметри для технічного підбору обладнання та обчислення очікуваної генерації. Вітрові характеристики с. Фонтанка роблять локацію повністю придатною для розгортання вітроенергетичної установки.

3.2 Вибір вітрогенератора

Локація котеджу безпосередньо у прибережній смузі села має специфічне середовище з підвищеною вологістю, засоленим повітрям та штормовими поривами. Зовнішні чинники прибережжя створюють агресивні умови експлуатації та здатні спричинити швидку корозію металевих конструкцій, не розрахованих на морський клімат. З цих умов перелік потенційних моделей був обмежений тільки тими установками, які адаптовані до прибережного клімату.

Порівняльний аналіз охопив доступні на українському ринку вітрогенератори потужністю 10 кВт. Саме на основі визначеного пікового навантаження домогосподарства у п. 2.2. зазначена потужність послужила головним орієнтиром відбору вітрогенеруючого агрегата.

Іншими додатковими критеріями відбору стали:

- горизонтально-осьова конструкція як найбільш ефективна в прибережних умовах із переважаючими стабільними вітрами північного та північно-східного напрямків;
- низька швидкість вмикання для підтримання генерації в літній період з пониженим індексом швидкості вітру;
- стійкість корпусу та лопатей до морського середовища;
- наявність офіційного постачання та сервісного обслуговування в Україні.

Комплексна оцінка за представленими параметрами звузило коло пошуку до трьох найбільш перспективних установок. Моделі BTS-ES 10 kW, G-Series RX-10 kW та NE-10kG 10 kW. Зіставлення технічних параметрів узагальнено в таблиці 3.1.

Усі три обрані моделі належать до класу малих горизонтально-осьових вітрогенераторів із трилопатеvim ротором та синхронним генератором на постійних магнітах. Але не дивлячись на однакову номінальну потужність, вони суттєво різняться за діаметром ротора, масою та конструктивним виконанням корпусу.

Таблиця 3.1 – Порівняльні технічні параметри 10-кіловатних вітрогенераторів

Параметр	BTS-ES 10 kW [12]	G-Series RX- 10 kW [13]	NE-10kG 10 kW [14]
1	2	3	4
Номінальна потужність (кВт)	10	10	10
Максимальна потужність (кВт)	13	12	13
Діаметр ротора (м)	7,2	5,8	8,2
Кількість лопатей	3		
Матеріал лопатей	Армоване скловолокно	Скловолокно	Армоване скловолокно
Матеріал корпусу	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь
Тип генератора	ПМСГ (NdFeB)	ПМСГ	ПМСГ (NdFeB) трифазний
Номінальна напруга (В)	380	120-380	220/240/380
Стартова швидкість вітру (м/с)	1	2,5	3
Номінальна швидкість вітру (м/с)	10	13	10
Максимальна швидкість вітру (м/с)	до 65	до 45	до 45
Система орієнтації	Електромагніт, поворот	Авт.	Електромагніт, нишпорення
Маса (кг)	400	314	400
Робоча температура	-40°C - 80°C	-80°C - 80°C	-40°C - 80°C
Термін служби (років)	20		

За результатами порівняльного аналізу найбільш збалансованим рішенням для виконання проєкту визнано вітрогенератор NE-10kG 10kW виробництва компанії Jiangsu Naier.

Ефективно перетворювати кінетичну енергію вітру в електричну дозволяє восьмиметровий діаметр вітроколеса. Завдяки значному охопленню повітряного потоку, лопаті турбіни здатні максимально продуктивно використовувати енергетичний потенціал локації. Виробник забезпечив конструкцію від впливу соляного морського повітря антикорозійним покриттям на основі епоксидної цинкованої ґрунтовки та поліуретанового фінішного шару покриття. Сумісність із внутрішньою електричною мережею котеджу досягається універсальністю номінальної напруги 220/240/380 В.

Крива потужності виробника (рис. 3.3) [15] повністю підтверджує аеродинаміку ротора та технічні параметри таблиці 3.1. Уже при швидкості вітру 3 м/с починається генерація корисної потужності, а в міру посилення потоку відбувається її активне нарощування. Свого заявленого номіналу в 10 кВт машина досягає на позначці швидкості вітру 10 м/с, після чого відбувається стабілізація виробітку.

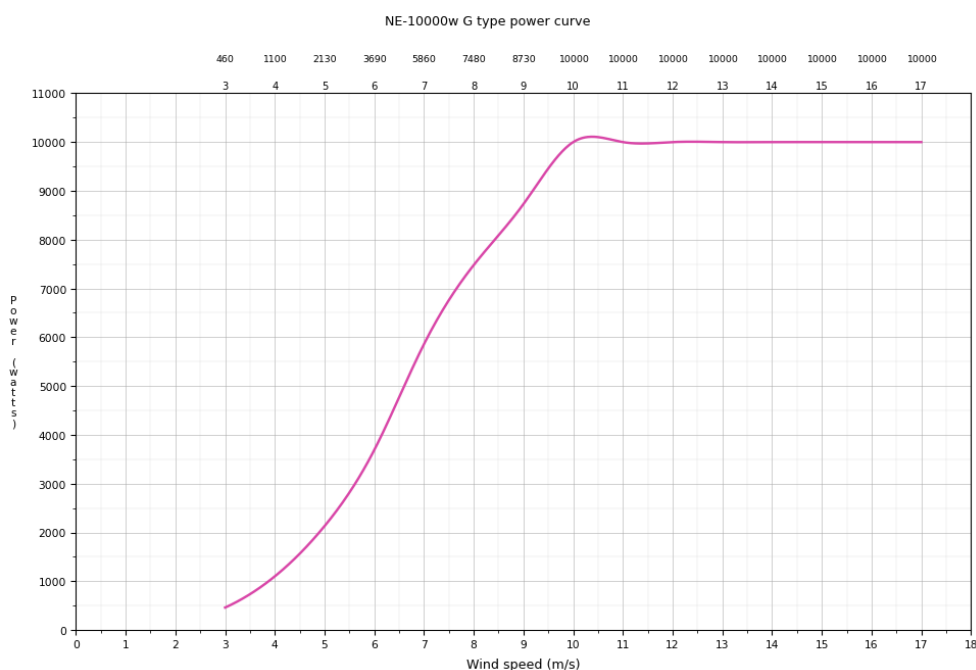


Рисунок 3.3 – Крива потужності NE-10kG 10kW

За сукупністю технічних переваг вітрогенератора NE-10kG 10kW над іншими, його обрано як основний генеруючий агрегат. Зовнішній вигляд представлено на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Горизонтальний вітрогенератор NE-10kG 10kW

3.3 Аеродинамічні параметри ВЕУ

Лопаті вітрогенератора NE-10kG виготовлені з армованого скловолокна за аеродинамічним профілем NASA 4412 [16]. Геометрія профілю відноситься до серії чотиризначних профілів NASA з максимальною товщиною 12% на відстані 30% від хорди та максимальним прогином 4% на відстані 40% від хорди. Візуалізація геометричної форми профілю зображено на рисунку 3.5.

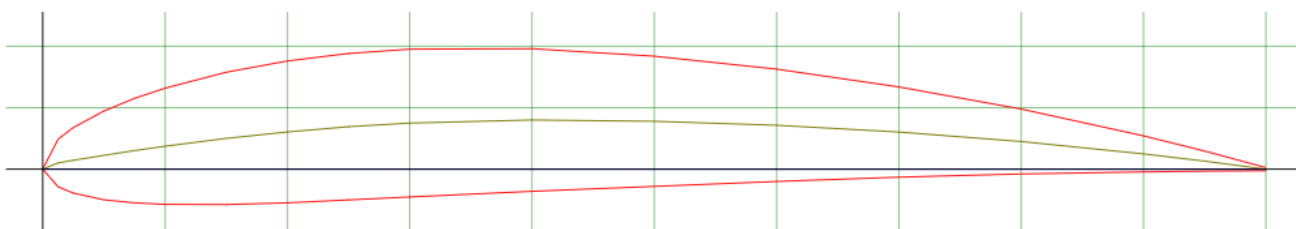


Рисунок 3.5 – Аеродинамічний профіль лопаті NASA 4412 [15]

Перш ніж проводити розрахунок аеродинамічного параметру ротора, необхідно визначити реальну швидкість на осі обертання. Зазначена раніше середньорічна швидкість вітру була на 100-метровій висоті. Фактично рівень розміщення гондоли вітрогенератора буде нижчим. У таблиці 3.2 перераховано за формулою (3.1) значення швидкості потоку на можливих робочих висотах.

Таблиця 3.2 – Прогнозовані показники швидкості вітру для доступних типорозмірів опор

Висота щогли, м	10	12	15	18	21
Швидкість вітру за (3.1), м/с	4,48	4,65	4,86	5,04	5,20

Дивлячись на результат, було прийнято висоту опори 18 м. За такої висоти швидкість вітру на осі ротора 5,04 м/с.

Захоплення кінетичної енергії вітрового потоку відбувається у робочій зоні, яку лопаті описують за траєкторією свого руху. Площа обмаху для горизонтально-осьового вітроколеса обчислюється за формулою [1, с. 44]:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.2)$$

де D – діаметр вітроколеса, м;

$$A = \frac{\pi \cdot 8,2^2}{4} = 52,81 \text{ м}^2.$$

Площа обмаху вітроколеса у $52,81 \text{ м}^2$ дозволяє захоплювати значний об'єм рухомих повітряних мас. Величину потужності вітрового потоку при проходженні крізь поверхню можна визначити за виразом [17, с. 140]:

$$N = C_{pmax} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (3.3)$$

де $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря;

C_{pmax} – коефіцієнт використання вітру. Для тихохідних вітроустановок коефіцієнт $C_p < 0,1$; для швидкохідних установок $C_p = (0,3 \dots 0,5)$. Приймаємо для моделі NE-10kG значення $C_p = 0,35$;

V – швидкість вітру, м/с.

При номінальній швидкості вітру $V_n = 10 \text{ м/с}$:

$$N_{\text{вітру}10} = 0,35 \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 10^3 \cdot 52,81 = 11552 \text{ Вт.}$$

При розрахунковій швидкості на висоті опори $V_{\text{розр}} = 5,04 \text{ м/с}$:

$$N_{\text{вітру}18} = 0,35 \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 5,04^3 \cdot 52,81 = 1479 \text{ Вт.}$$

Оптимальна швидкохідність для трилопатевого ротора з профілем лопаті НАСА 4412 визначається за формулою [1, с. 111]:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V}, \quad (3.4)$$

де ω – кутова швидкість, рад/с;

$R = 0,5 \cdot D = 4,1 \text{ м}$ – радіус ротора;

V – швидкість вітру, м/с.

Оптимальна швидкохідність для n -лопатевого вітроколеса наближено визначається як [18, с. 18]:

$$Z_0 = \frac{4 \cdot \pi}{n_{\text{лоп}}}, \quad (3.5)$$

де $n_{\text{лоп}} = 3$ – кількість лопатей вітроколеса.

$$Z_0 = \frac{4 \cdot \pi}{3} = 4,2.$$

Для трилопатевого ротора теоретичне базове значення швидкохідності визначено 4,2. Але сучасні горизонтально-осьові вітроустановки оснащені лопатями з високоефективними профілями. Для них, як правило, оптимальна швидкохідність лежить у межах $Z_0 = 6-7$ [19].

Лопаті обраного вітрогенератора NE-10kG з основою профілю НАСА 4412 мають максимальне співвідношення коефіцієнтів підйомної сили та лобового опору $C_L/C_d = 107,5$ [16]. Такий показник відноситься до класу високоефективних аеродинамічних профілів. Тому, для подальших розрахунків приймається $Z_0 = 7$.

Кутова швидкість ротора визначається з виразу (3.4):

$$\omega = \frac{Z_0 \cdot V}{R} = \frac{7 \cdot 10}{4,1} = 17,07 \text{ рад/с.} \quad (3.6)$$

Число обертів ротора n визначимо через вираз [20, с. 25]:

$$n = \frac{60 \cdot V \cdot Z_0}{\pi \cdot D}.$$

$$n = \frac{60 \cdot 10 \cdot 7}{\pi \cdot 8,2} = 163 \text{ об/хв.} \quad (3.7)$$

Крутний момент на валу вітрогенератора [20, с. 25]:

$$M = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega}. \quad (3.8)$$

де $P_{\text{ном}} = 10000$ Вт – номінальна потужність вітрогенератора.

$$M = \frac{10000}{17,07} = 585,8 \text{ Н·м.}$$

3.4 Вибір електрогенератора

Сучасні вітроенергетичні установки комплектують електрогенераторами трьох типів. Застосовують синхронні генератори, асинхронні генератори та генератори постійного струму.

Синхронна машина може подавати енергію лише при постійній швидкості обертання. Її швидкість пов'язана з частотою струму. Через це вал вітрогенератора повинен підтримувати постійну або майже постійну швидкість обертання навіть за умов зміни вітру. Встановлений редуктор між ротором і генератором стабілізує оберти вала. Добуток обертів вітроколеса та передавального числа редуктора приводять у відповідність до частоти мережі з урахуванням кількості пар полюсів. У таких випадках перевагу віддають явнополюсним синхронним генераторам. Підтримувати постійну швидкість на валу генератора допомагає регулювання кута нахилу лопатей на сигнал мультиплікатора [3].

В проєкті реалізується прямий привід без редуктора. Номінальна частота обертання ротора ВЕУ визначено формулою (3.7) в 163 об/хв. За таких умов обирається трифазний генератор із постійними магнітами (СППМ) з зіркоподібним ротором. Працює такий тип машини на змінній частоті обертання, не потребує щіток і обмотки збудження, має низькі втрати на холостому ході [20,21]. Схему ВЕУ з синхронним генератором із постійними магнітами подано на рисунку 3.6.

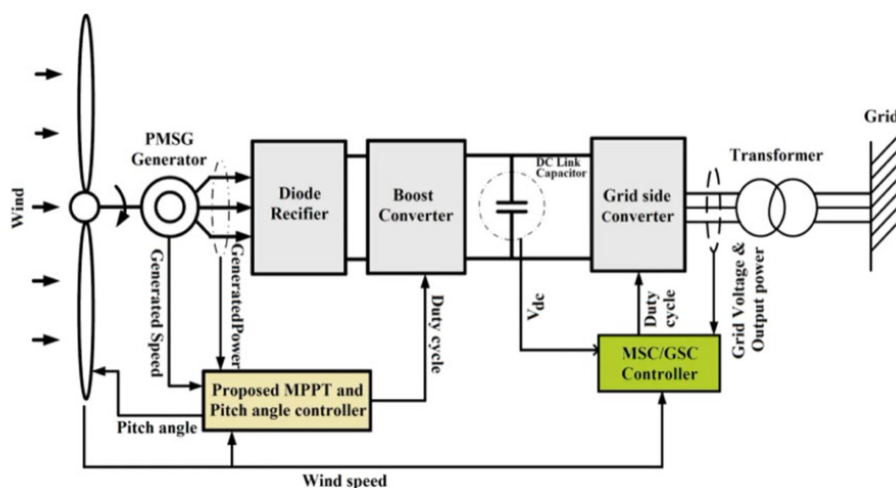


Рисунок 3.6 – Схема ВЕУ з СППМ [22]

Незважаючи на те, що котедж з однофазною мережею, генератор проектується як трифазний. Конструктивною відмінністю між однофазними та трифазними СГПМ є лише схема з'єднання обмоток і спосіб підключення до мережі.

Питома потужність однофазного генератора нижча за трифазний при однаковому масогабариті:

$$P_{1\phi} \approx 0,7 \cdot P_{3\phi}. \quad (3.9)$$

Робота в однофазному режимі можлива за умови послідовного з'єднання двох фаз і вимиканням третьої. Вихідна напруга становитиме $U_{вих} = 2U_{\phi} = 230 \text{ В}$.

Технічне визначення параметрів електрогенератора та розрахунок габаритів машини проведено за методиками, викладеними у науково-методичних працях [20,21].

Вихідні дані для розрахунку:

- Номінальна активна потужність $P_n = 10 \text{ кВт}$;
- Коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,8$;
- Номінальна лінійна напруга $U_n = 230 \text{ В}$;
- Частота мережі $f = 50 \text{ Гц}$;
- Номінальна частота обертання ротора $n = 163 \text{ об/хв}$;
- Число фаз $m = 3$;
- Радіус вітрового ротора ВЕУ $R = 4,1 \text{ м}$.

Число пар полюсів визначається з умови синхронізму частоти ЕРС генератора з частотою мережі:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n}, \quad (3.10)$$

де f – частота мережі, Гц;

n – номінальна частота обертання, об/хв.

$$p = \frac{60 \cdot 50}{163} = 18 \text{ полюсів.}$$

Відповідно $2p = 36$.

Повна потужність синхронного генератора:

$$S_p = \frac{k_E \cdot P_H}{\cos \varphi}, \quad (3.11)$$

де k_E – відношення ЕРС збудження до номінальної фазної напруги; для СГПМ приймається $k_E = 1,2 \dots 1,4$.

$$S_p = \frac{1,3 \cdot 10}{0,8} = 16,25 \text{ кВА.}$$

Головними розмірами генератора є внутрішній діаметр магнітопроводу статора D та осьова довжина повітряного зазору l_δ .

$$D = \sqrt[3]{\frac{12,2 \cdot p \cdot S_p}{\lambda \cdot \pi \cdot n_H \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_O \cdot B_\delta \cdot A}}, \quad (3.12)$$

де α_δ – коефіцієнт полюсного перекриття; приймається в межах $\alpha_\delta = 0,6 \dots 0,73$;

k_B – коефіцієнт форми ЕРС; в межах $k_B = 1,08 \dots 1,13$;

k_O – обмотковий коефіцієнт; у багатополюсних СГПМ обмотку виконують двошарову, тому обмотковий коефіцієнт $k_O = 0,92$;

B_δ – індукція у повітряному зазорі; для NdFeB обирають $B_\delta = 0,8 \dots 0,85$ Тл;

A – лінійне навантаження якоря; для СМ до 100 кВт значення обирається у межах $A = (1,4 \dots 2,2) \cdot 10^4$ А/м;

λ – коефіцієнт умов охолодження; залежить від кількості полюсів і для багатополюсних СМ ($p = 18$) $\lambda = 1,7$.

$$D = \sqrt[3]{\frac{12,2 \cdot 18 \cdot 16,25 \cdot 10^3}{1,7 \cdot \pi \cdot 163 \cdot 0,72 \cdot 1,1 \cdot 0,92 \cdot 0,83 \cdot 2,2 \cdot 10^4}} = 0,675 \text{ м.}$$

Осьова довжина магнітопроводу статора:

$$l_\delta = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D}{2p}. \quad (3.13)$$

$$l_\delta = \frac{1,7 \cdot \pi \cdot 0,675}{38} = 0,1 \text{ м.}$$

Полюсний поділ, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}. \quad (3.14)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot 0,675}{36} = 0,059 \text{ м.}$$

Магнітний потік у межах прийнятого полюсного поділу, утворюваний полюсом постійного магніту:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_{\delta}. \quad (3.15)$$

$$\Phi_{\delta} = 0,83 \cdot 0,059 \cdot 0,1 \cdot 0,72 = 0,00353 \text{ Вб.}$$

ЕРС збудження за номінальної фазної напруги:

$$E_f = k_E \cdot U_H, \quad (3.16)$$

де $U_H = 220/\sqrt{3} = 127 \text{ В}$ – номінальна фазна напруга.

$$E_f = 1,3 \cdot 127 = 165,1 \text{ В.}$$

Попереднє число витків фази:

$$w_I = \frac{E_f}{4 \cdot k_B \cdot k_O \cdot f_H \cdot \Phi_{\delta}}. \quad (3.17)$$

$$w_I = \frac{165,1}{4 \cdot 1,1 \cdot 0,92 \cdot 50 \cdot 0,00353} = 231 \text{ витків.}$$

Номінальний фазний струм якоря:

$$I_H = \frac{P_H}{m \cdot U_H \cdot \cos \varphi}. \quad (3.18)$$

$$I_H = \frac{10000}{3 \cdot 127 \cdot 0,8} = 33 \text{ А.}$$

Зубцевий поділ для СМ до 100 кВт має знаходитись у діапазоні:

$$8 \text{ мм} \leq z \leq 20 \text{ мм.} \quad (3.19)$$

$$z = \frac{\pi \cdot D}{(0,02 \dots 0,008)} = z_{\min} \dots z_{\max}. \quad (3.20)$$

$$z = \frac{\pi \cdot 0,675}{(0,02 \dots 0,008)} \rightarrow z_{\min} = 106, z_{\max} = 265.$$

Задаємось числом пазів $z = 135$, після чого визначаємо зубцевий поділ:

$$t_z = \frac{\pi \cdot D}{z}, \quad (3.21)$$

де $z = 135$ – обране число пазів якоря.

$$t_z = \frac{\pi \cdot 0,675}{135} = 0,01571 \text{ м.}$$

Перевірка (3.19):

$$8 \text{ мм} \leq 15,71 \text{ мм} \leq 20 \text{ мм}.$$

Число пазів на полюс і фазу (дробове):

$$q = \frac{z}{2p \cdot m} \quad (3.22)$$

$$q = \frac{135}{36 \cdot 3} = \frac{5}{4}.$$

Дробове число $q = 5/4$ виражається як $b + c/d = 1 + 1/4$, де знаменник $d = 4$ не є кратним 3 і менший за $2p = 36$ – умова симетрії трифазної обмотки виконана.

Найбільший спільний дільник для перевірки умов симетрії $t = 15$:

$$\frac{2p}{d} = \text{ціле число.} \quad (3.23)$$

$$\frac{z}{mt} = \text{ціле число.} \quad (3.24)$$

Перевірка (3.23, 3.24): $2p/d = 9$ – ціле число, $z/(mt) = 3$ – ціле число.

Полюсний поділ у зубцях:

$$\tau_z = m \cdot q = 3 \cdot 1,25 = 3,75. \quad (3.25)$$

Крок секції обмотки обирається як найближче ціле значення від τ_z :

$$y = (0,8 \dots 0,86) \cdot \tau_z. \quad (3.26)$$

$$y = 0,8 \cdot 3,75 = 3.$$

Відносний крок секції:

$$\beta = y/\tau_z = 3/3,75 = 0,8. \quad (3.27)$$

Уточнений обмотковий коефіцієнт для першої гармоніки знаходиться як добуток коефіцієнтів скорочення кроку та розподілення.

$$k_{обм} = k_{ск} \cdot k_p, \quad (3.28)$$

де $k_{ск}$ – коефіцієнт скорочення кроку, в.о.;

k_p – коефіцієнт розподілення, в.о.

Коефіцієнт скорочення кроку:

$$k_{ск} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.29)$$

$$k_{ск} = \sin\left(0,8 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,951.$$

Коефіцієнт розподілення для дробової обмотки:

$$k_{\text{ск}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{N \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot N}\right)}, \quad (3.30)$$

де $N = b \cdot d + c = 4 \cdot 1 + 1 = 5$.

$$k_{\text{ск}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 5}\right)} = 0,957.$$

Уточнений обмотковий коефіцієнт, в.о.:

$$k_{\text{обм}} = 0,951 \cdot 0,957 = 0,91.$$

Для двошарової петльової обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу максимально можливе число паралельних віток дорівнює 18.

З конструктивних міркувань приймається $a = 1$ вітка.

Число ефективних провідників у пазу:

$$u_{\text{п}} = \frac{w1 \cdot a}{q \cdot p}. \quad (3.31)$$

$$u_{\text{п}} = \frac{231 \cdot 1}{1,25 \cdot 18} = 10 \text{ провідника.}$$

Уточнене число витків фази:

$$w1 = \frac{u_{\text{п}} \cdot q \cdot p}{a} = \frac{10 \cdot 1,35 \cdot 18}{1} = 225 \text{ витків.} \quad (3.32)$$

Уточнене лінійне навантаження:

$$A = \frac{z \cdot u_{\text{п}} \cdot I_{\text{н}}}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{135 \cdot 10 \cdot 33}{\pi \cdot 0,675 \cdot 1} = 2,1 \cdot 10^4 \text{ А/м.} \quad (3.33)$$

Уточнений магнітний потік:

$$\Phi_{\delta} = \frac{E_f}{4 \cdot k_B \cdot k_O \cdot f_H \cdot w_I} = \frac{165,1}{4 \cdot 1,1 \cdot 0,91 \cdot 50 \cdot 225} = 0,00367 \text{ Вб}, \quad (3.34)$$

де $k_{\text{обм}} = 0,91$ – уточнений обмотковий коефіцієнт за (3.28);

w_I – уточнене число витків за (3.32).

Уточнена індукція у повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\tau \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_{\delta}} = \frac{0,00367}{0,059 \cdot 0,1 \cdot 0,72} = 0,86 \text{ Тл.} \quad (3.35)$$

де $\Phi_{\delta} = 0,00367 \text{ Вб}$ – уточнений магнітний потік за (3.34).

Зовнішній діаметр статора:

$$D_a = k_d \cdot D, \quad (3.36)$$

де $k_d = 1,3$ згідно [19, с. 31].

$$D_a = 1,3 \cdot 0,675 = 0,88 \text{ м.}$$

Для СГ потужність до 100 кВт густину струму приймають в межах $j = (3,5 \dots 6,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Обмотка виконується з проводу марки ПЕТВ прямокутного перерізу класом нагрівостійкості В.

Зовнішній діаметр ротора:

$$D_p = D - 2 \cdot \delta, \quad (3.37)$$

де δ – величина повітряного зазору:

$$\delta = (0,25 + D) \cdot 10^{-3}. \quad (3.38)$$

$$\delta = (0,25 + 0,675) \cdot 10^{-3} = 0,001 \text{ м} = 1 \text{ мм.}$$

$$D_p = 0,675 - 2 \cdot 0,001 = 0,673 \text{ м.}$$

Розрахунковий повітряний зазор:

$$\delta_p = k_\delta \cdot \delta, \quad (3.39)$$

де $k_\delta = 1,81$ – коефіцієнт повітряного зазору.

$$\delta_p = 1,81 \cdot 1 = 1,81 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_\delta = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1-\alpha_p}}, \quad (3.40)$$

де $\alpha_p = 0,68$ – конструктивний коефіцієнт.

$$\alpha_\delta = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,059}{0,00181} + \frac{6}{1-0,68}} = 0,758.$$

Ширина постійного магніту:

$$b_M = \alpha_\delta \cdot \tau = 0,758 \cdot 0,059 = 0,04472 \text{ м.} \quad (3.41)$$

Висота магніту:

$$h_M = \frac{D_p}{2} - \frac{p(b_M + \Delta_{min})}{\pi}, \quad (3.42)$$

де $\Delta_{\min} = 5 \dots 10$ мм – відстань між магнітами.

$$h_M = \frac{0,673}{2} - \frac{18(0,04472 + 0,007)}{\pi} = 0,04016 \text{ м.}$$

В осьовому напрямку довжина магніту дорівнює:

$$l_M = l_\delta = 0,1 \text{ м.} \quad (3.43)$$

Основні розрахункові параметри СПГМ:

- внутрішній діаметр статора $D = 0,675$ м;
- зовнішній діаметр статора $D_a = 0,88$ м;
- зовнішній діаметр ротора $D_p = 0,673$ м
- осьовий напрям довжини магнітопроводу статора і ротора $l_M = l_\delta = 0,1$ м;
- коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_\delta = 0,758$;
- ширина полюсного магніту $b_M = 0,04472$ м;
- висота полюсного магніту $h_M = 0,04016$ м.

3.5 Вибір додаткового обладнання для вітроенергетичної установки

Вітрогенератор є лише генеруючим елементом системи. Для того щоб перетворити, накопичити, розподілити вироблену електроенергію необхідний комплекс додаткового обладнання. Структурна схема автономної вітроенергетичної системи котеджу представлена на рисунку 3.7.

Off-grid system diagram

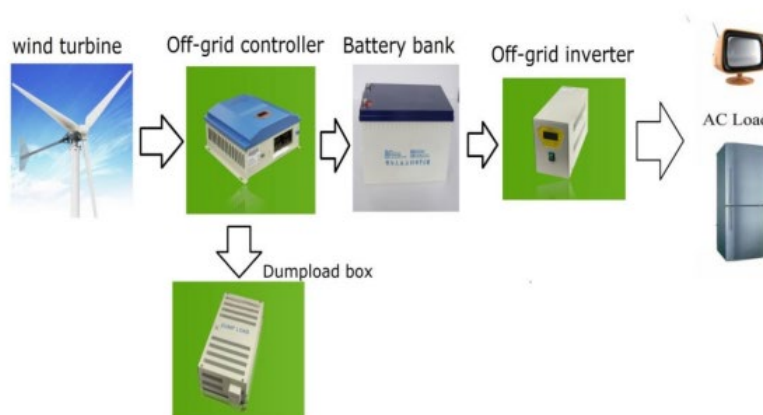


Рисунок 3.7. – Структурна схема автономної вітроенергетичної системи [15, с. 3]

З рисунку 3.7 видно, що система складається з 4 основних елементів:

- 1) контролера заряду з баластним навантаженням (dump load);
- 2) акумуляторних батарей;
- 3) інвертора;
- 4) комутації та захисту.

Вітрогенератор генерує змінний струм, який надходить на контролер заряду. У контролері (Wind Charge Controller) відбувається випрямлення струму та приведення до придатних параметрів для безпечного накопичення в акумуляторній банці. Запасена енергія постійного струму у акумуляторах переходить на вхід інвертора. Силовий модуль формує синусоїдальну змінну напругу 220 В частотою 50 Гц та живить споживачів котеджу.

В електрощитовій котеджу сформовано два незалежних контури навантаження. Контур А «критичне навантаження» підключається до виходу

резервного живлення інвертора. Живлення відбувається від вітрогенератора в пріоритетному режимі незалежно від стану зовнішньої мережі. Контур Б «загальне навантаження» під'єднаний до вводу зовнішньої мережі. Це непріоритетні прилади (пральна та сушильна машини, духовка шафа, зарядна станція електромобіля і інші). При зникненні електропостачання з мережі контур Б знеструмлюється миттєво, а контур А продовжує роботу.

3.5.1 Вибір типу та моделі інвертора

Інвертори залежно від призначення поділяються на [17]:

- Автономний інвертор функціонує виключно від акумуляторної батареї незалежно від зовнішньої мережі. Встановлюється, коли немає доступу до мережі. Дешевший, але не дає можливості взаємодіяти з мережею та використовувати надлишки генерації ВЕУ;
- Мережевий інвертор працює паралельно з мережею. Не забезпечує автономність, тому підходить для об'єктів з надійним мережевим підключенням;
- Гібридний інвертор поєднує функціонал обох типів. Пріоритет живлення споживачів надається від ВЕУ та акумуляторів, а при необхідності може як споживати енергію з мережі, так і передавати залишки назад.

Котедж підключений до мережі, тому гібридний інвертор залишається найкращим варіантом. Він забезпечить автономне живлення контуру А і взаємодіятиме з мережею для контуру Б.

Знайти необхідну потужність інвертора можна з умови:

$$P_{inv} \geq P_{пik} \cdot k_{зан} , \quad (3.44)$$

де $P_{пik} = 9,37$ кВт – пікова потужність;

$k_{об.м} = 1,25$ – коефіцієнт запасу на пускові струми;

$$P_{inv} \geq 9,37 \cdot 1,25 = 11,7 \text{ кВт.}$$

Передбачається використовувати гібридний інвертор LuxPower LXP LB-12K

(рис. 3.8) з потужністю 12 кВт, напругою АКБ 48 В.



Рисунок 3.8 – Інвертор LuxPower LXP LB-12K [23]

Нижче в таблиці 3.3 приведені технічні характеристики інвертора [23].

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики LuxPower LXP LB-12K

Технічні характеристики	Значення
1	2
Номінальна вихідна потужність АС	12 кВт
Номінальна напруга акумулятора (АКБ)	48 В
Відповідний тип батареї	Свинцево-кислотна батарея або літій-іонна/літієва батарея
Максимальний зарядний струм	250 А
Максимальний розрядний струм	250 А
Частота	50 Гц
Номінальна напруга	230 В АС (однофазний)
Максимальний ККД	98%

3.5.2 Вибір контролера заряду (Wind Charge Controller)

Вітровий контролер завжди підтримує генератор під навантаженням, бо розрив кола під час обертання неприпустимий. Після повного заряду батареї зайва енергія автоматично спрямовується на баластне навантаження (dump load).

Вхідний струм контролера розраховується з умови пропускання максимальної потужності генератора:

$$I_{\text{вх}} = \frac{P_n}{U_{\text{АКБ}}} \cdot 1,25, \quad (3.45)$$

де $P_n = 10000$ Вт – номінальна потужність вітрогенератора;

$U_{\text{АКБ}} = 48$ В – напруга акумуляторів;

1,25 – необхідний запас.

$$I_{\text{вх}} = \frac{10000}{48} \cdot 1,25 = 260 \text{ А.}$$

На підставі розрахованої формули (3.46) обрано спеціалізований контролер серії FKJ-B PWM. Виготовляється модель під індивідуальне технічне замовлення. Передбачається замовити на номінальний струм заряду 300 А. Комплектуватися буде зовнішнім резистивним навантаженням потужністю 12 кВт [24].



Рисунок 3.9 – Вигляд контролеру заряду [24]

3.5.3 Вибір акумуляторних батарей

Акумуляторні батареї можна циклічно заряджати та розряджати, багаторазово повертаючи до робочого стану. Вони можуть накопичувати енергію вітрогенератора та віддавати її в навантаження у безвітряні години. Від ємності, глибини розряду та циклічного ресурсу буде залежати як довго накопичувачі послужитимуть для безперебійної роботи всього обладнання.

Популярними варіантами при виборі типу АКБ досі залишаються свинцево-кислотні AGM та літій-залізо-фосфатні LiFePO₄. Дві технології виготовлення неодноразово порівнювались у різних дослідженнях. Узагальнені результати одного з таких порівняльних досліджень [25] наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння типів акумуляторів [25]

Характеристики	LiFePO ₄	AGM
1	2	3
Щільність енергії	100-265 Вт·год/кг	30-50 Вт·год/кг
Цикл	2000-5000	300-1000
Глибина розряду	0,8С-1,0С	0,5С
Швидкість заряджання	1-3 год.	6-12 год.
Ефективність заряду/розряду	95-98%	70-85%
Обслуговування	Непотрібно	Долив води, очищення клем
Вартість	Дорога	Значно дешевша

Накопичувачем енергії проєктованої автономної системи вибрано LiFePO₄. Ємність розраховується з наміром забезпечити роботу критичного контуру А котеджу протягом доби:

$$C = \frac{E_{нав}}{U_{АКБ} \cdot DOD \cdot \eta_{інв}}, \quad (3.46)$$

де $E_{нав} = 47900$ Вт·год – номінальна потужність вітрогенератора;

$DOD = 0,8$ – глибина розряду;

$\eta_{інв} = 0,98$ – ККД інвертора.

$$C = \frac{47900}{48 \cdot 0,8 \cdot 0,93} = 1342 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Під цю задачу обрано акумулятор MUST LP21-48300 ємністю 300 А·год.
Кількість модулів:

$$n = \frac{C}{C_{\text{мод}}} = \frac{1342}{300} = 5 \text{ шт.} \quad (3.47)$$

Загальна ємність бану 1500 А·год забезпечить у зимовий період автономність у 1,12 доби, а у літній 1,86 доби. Саме літом, коли генерація ВЕУ менша акумулятори компенсують цей дефіцит.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики MUST LP21-48300 [26]

Технічні характеристики	Значення
1	2
Номінальна напруга	51,2 В
Номінальна ємність	300 А·год
Номінальний запас енергії	15360 Вт·год
Напруга повного розряду	44 В
Кількість циклів при 80% DOD	>4500
Рекомендований струм заряду	0.2C (60А)
Стандартний струм розряду	150 А
Максимально постійний струм заряду/розряду	200 А/ 200 А
Вага	120 кг



Рисунок 3.10 – Вигляд акумулятора MUST LP21-48300 [26]

3.6 Монтаж вітрогенератора

Розміщувати установку слід на відкритій рівній ділянці, максимально віддалено від будь-яких перешкод та об'єктів. Загальноприйняті вимоги щодо розміщення ВЕУ передбачають насамперед виконання двох умов [4]:

1. висота башти вітрогенератора має бути не менше подвійної висоти найближчої перешкоди у вигляді дерева, будівлі (правило $2H$);
2. якщо поблизу є перешкоди з навітряного боку або передбачається встановлення кількох установок, відстань між ними має становити не менше десятикратної висоти перешкоди (правило $10H$).

Принципові схема правильного та неправильного розташування ВЕУ відносно перешкод представлено на рисунку 3.11.

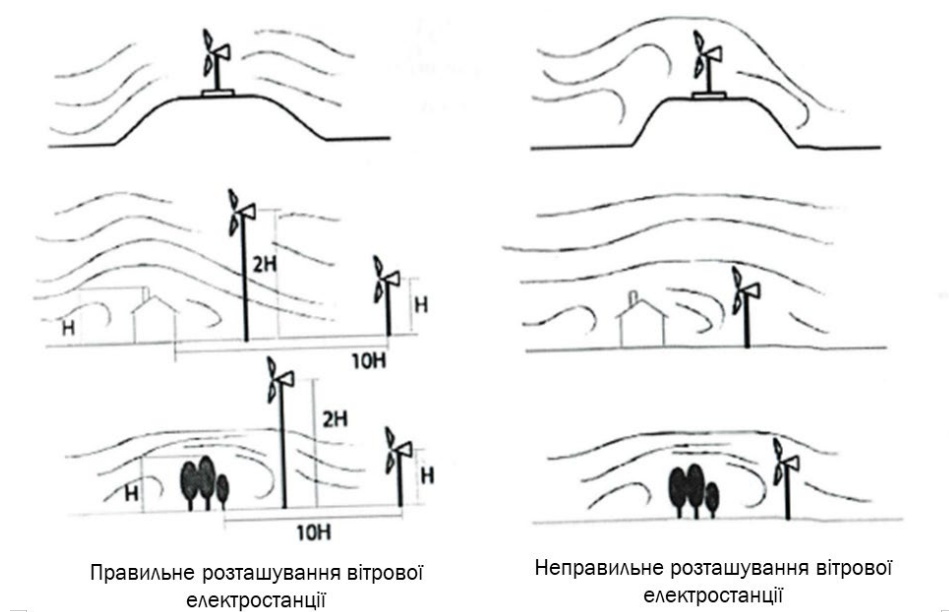


Рисунок 3.11 – Правильне та неправильне розташування ВЕУ відносно перешкод [4, с. 79]

Територія ділянки котеджу має розміри 40×60 . Вітрогенератор планується розміщувати у південно-західному куті ділянки не менше 5 м від межі. Хоча будівля висотою 7 м знаходиться з боку приходу, вона не створює перешкод для основного робочого потоку за правилом $2H$.

Перевірка правила 2Н для будівлі котеджу:

$$H_{\text{бапти}} \geq 2 \cdot H_{\text{перешкоди}}, \quad (3.48)$$

де $H_{\text{бапти}} = 18$ м – висота, на якій встановлено ВЕУ;

$H_{\text{перешкоди}} = 7$ м – висота будинку.

$$18 \geq 2 \cdot 7 = 14 \text{ м.}$$

Умова виконується з запасом у 4 м.

На цій ділянці встановлюється лише одна вітроустановка, тому правило 10Н не впливає на розміщення.

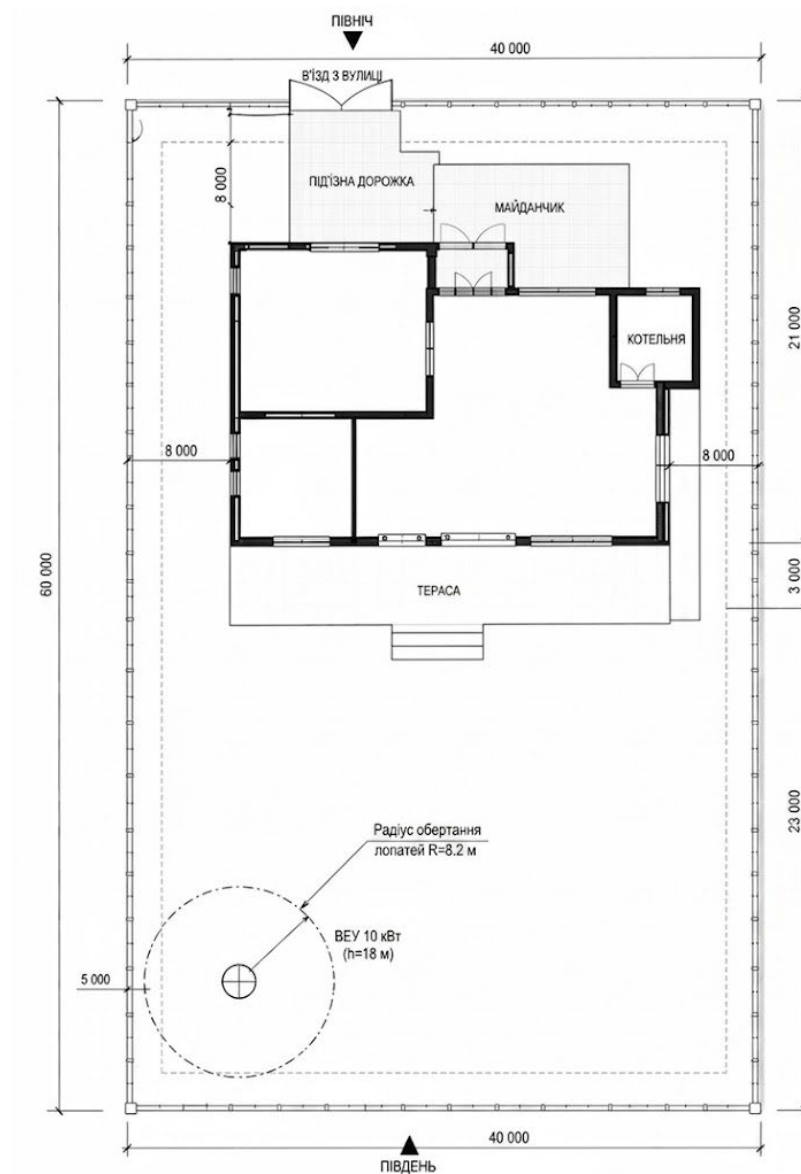


Рисунок 3.12 – План ділянки розміщення

У рамках підготовки до встановлення вітрогенератора NE-10kG проаналізовано суцільну сталеву опору та відтяжну конструкцію з тросами. Остання програє через необхідний радіус анкерування тросів на 15 м. Спроба встановити таку щоглу по центру вільної зони займе майже весь простір заднього двору. Натомість вільностояча циліндрична опора не потребуватиме відтяжних конструкцій і компактно розміститься в куті ділянки.

Секційна конструкція щогли складається з окремих секцій, з'єднаних між собою фланцевими з'єднаннями на болтах М27. Загальну схему конструкції вітрогенератора на опорі представлено на рисунку 3.13.

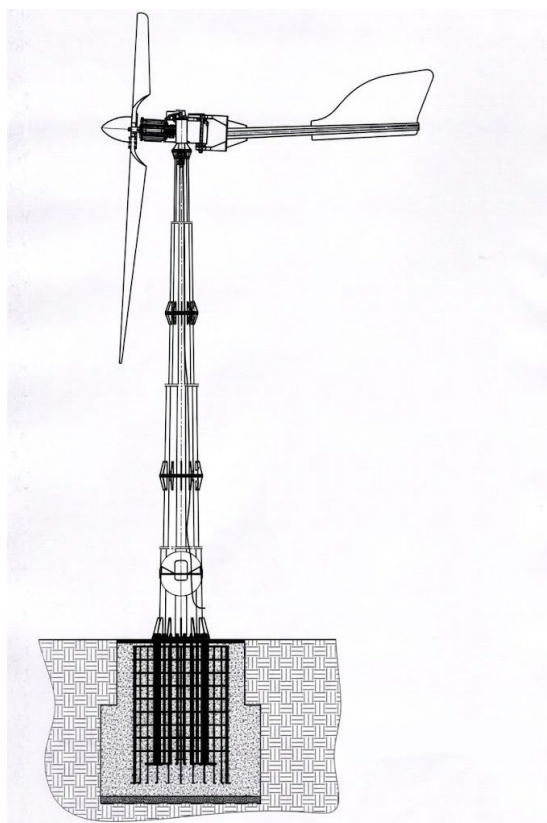


Рисунок 3.13 – Конструкція вітрогенератора на опорі [27, с. 8]

Фундамент опори виконується у вигляді монолітного залізобетонного блоку. Розміри блоку 2500×2500 мм, глибина закладання 1500 мм, клас бетону С20, армування – сітки Ø12 мм з кроком 125 мм. Опора кріплення складається з 24 болтів М27 (рис. 3.14) [27].

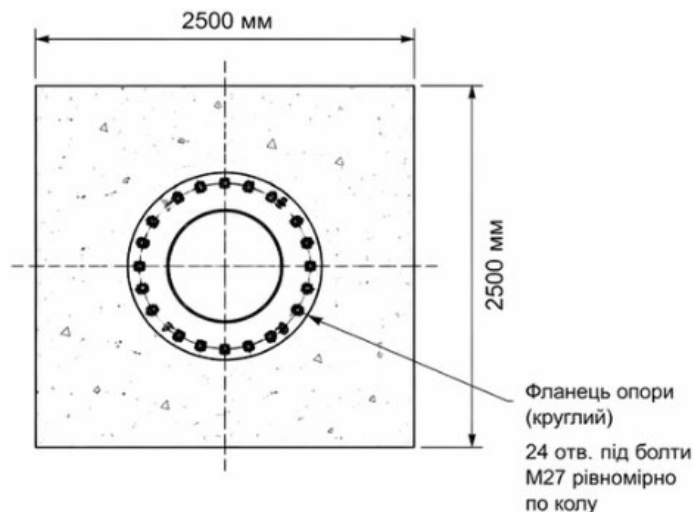


Рисунок 3.14 – План кріплення опори ВЕУ до фундаменту [27]

Ґрунт у селі Фонтанка за картою ґрунтів України відноситься до темно-каштанових залишково-солонцюватих [28]. Несуча здатність 150-200 кПа [29] і перевищує вимогу виробника у 120 кПа.

Спочатку виконується бетонування фундаментного блоку з установкою анкерних болтів та закладних деталей. Бетон витримується не менше 28 діб. Одночасно з фундаментними роботами прокладається траншея для підземної кабельної лінії від місця встановлення ВЕУ до електрощитової котеджу. Після виконується складання секцій опори та з'єднання фланців болтами, протягування електричного кабелю, монтаж корпусу генератора до верхньої секції, встановлення хвостового оперення та підключення кабелів. Ротор складають за процедурою монтажу трьох лопатей на маточину вітрогенератора при вертикальному положенні осі. Завершує роботи підйом зібраної опори з фіксацією її фланця до анкерних болтів фундаменту.

Підключення контролера заряду, акумуляторів та навантаження має бути виконано до першого обертання ротора. Невиконання вимоги призведе до пошкодження генератора.

3.7. Технічні характеристики ВЕУ

Нижче сформовано єдину апаратно-технічний комплекс вітроенергетичної установки для автономного електропостачання котеджу.

Таблиця 3.6 – Зведена технічна характеристика розробленої вітроенергетичної установки

Технічний параметр	Значення
1	2
Розрахункова швидкість вітру на осі ротора	5,04 м/с (18 м висота)
Модель вітрогенератора	NE-10kG 10 kW
Номінальна/максимальна потужність	10 кВт / 13 кВт
Орієнтація осі обертання	Горизонтально-осьова
Діаметр вітроколеса	8,2 м
Кількість та матеріал лопатей	3, армоване скловолокно
Аеродинамічний профіль лопаті	NACA 4412
Стартова/номінальна/максимальна швидкість вітру	3 м/с, 10 м/с, до 40 м/с
Тип генератора	СГПМ / NdFeB
Число фаз	3 фази / 230 В
Номінальна частота обертання	163 об/хв
Повна розрахункова потужність	16,25 кВА ($\cos\varphi = 0,8$)
Конструкція щогли	Вільностояча циліндрична секційна опора
Висота башти	18 м
Характеристики фундаменту	Монолітний з/б блок 2500×2500×1500 мм (бетон C20)
Додаткове обладнання	Інвертор: LuxPower LXP LB-12K Контролер заряду: FKJ-B PWM 10 кВт, 300 А + dump load 12 кВт АКБ: MUST LP21-48300 – 5 шт.

3.8 Аналіз результатів розрахунку характеристик ВЕУ

Таким чином спроектована вітроенергетична система включає вітрогенератор NE-10kG потужністю 10 кВт на вільностоячій опорі висотою 18 м, акумуляторний блок загальною ємністю 1500 А·год та гібридний інвертор.

Завдання проектування і впровадження вітроустановки в котедж було забезпечити живлення групи навантаження контуру А. Зовнішня мережа залишається основним джерелом для загального навантаження контуру Б і не враховується в цьому аналізі. Підібраний комплекс обладнання покриває живлення річним виробітком 11011 кВт·год при річному споживанні 13998 кВт·год.

Оцінка виконання поставленої задачі відображена у побудованій круговій діаграмі (рис. 3.15).

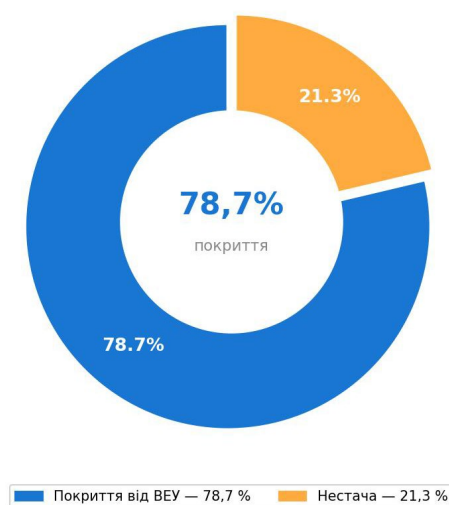


Рисунок 3.15 – Частка покриття навантаження контуру А від ВЕУ

З діаграми видно нестачу у 21,3% або ж 2987 кВт·год на рік. Припадає вона переважно на літній період червня-серпня коли індекс швидкості вітру менші. Усувається зазначена нестача скороченням годин роботи системи фільтрації, переведенням вентиляції у роботу вночі, зменшення освітленості. Якщо дотримуватися економного режиму можна зменшити використання енергії на 4,7 кВт·год на добу. Тоді, критичні споживачі котеджу завжди захищені від перебоїв електропостачання.

3.9 Висновки до третього розділу

У 3 розділі проведений повний цикл проєктування автономної вітроенергетичної системи котеджу. Згідно даних Global Wind Atlas у місці встановлення вітрогенератора середньорічна швидкість вітру на 100-метровій висоті фіксується на позначці 7,1 м/с. На обраній 18-метровій висоті опори швидкість вітру в середньому досягає значень 5,04 м/с.

Шляхом порівняльного аналізу трьох моделей горизонтально-осьових вітрогенераторів вибір зупинився на NE-10kG з діаметром ротора 8,2 м. Правильність вибору підтверджена аеродинамічним розрахунком.

Підібране додаткове обладнання автономної ВЕУ містить в собі гібридний інвертор, акумуляторні батареї та контролер заряду з dump load. Реалізовано двоконтурну схему, де контур А з критичним навантаженням живиться від ВЕУ автономно, а контур Б із загальним навантаженням продовжує використовувати мережу. АКБ здатні покрити відсутність генерації у 1,12 доби взимку та 1,86 доби влітку.

Після аналізу виробітку ВЕУ та запропонованого зменшення годин роботи обладнання в період нестачі генерації критичні споживачі котеджу завжди захищені від перебоїв електропостачання.

4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕУ

4.1 Моделювання генератора БЕУ в ANSYS Maxwell

Підтвердження розрахованих параметрів синхронного генератора на постійних магнітах виконано комп'ютерним моделюванням в програмі ANSYS Maxwell. Програмний комплекс дозволяє отримати детальний розподіл магнітного поля в конструктивних елементах машини та розрахувати характеристики. Моделювання охопило двовимірний аналіз електромагнітних процесів та тривимірну візуалізацію конструкції. Двовимірна модель генератора в поперечному перерізі наведена на рисунку 4.1, а тривимірна – на рисунку 4.2.

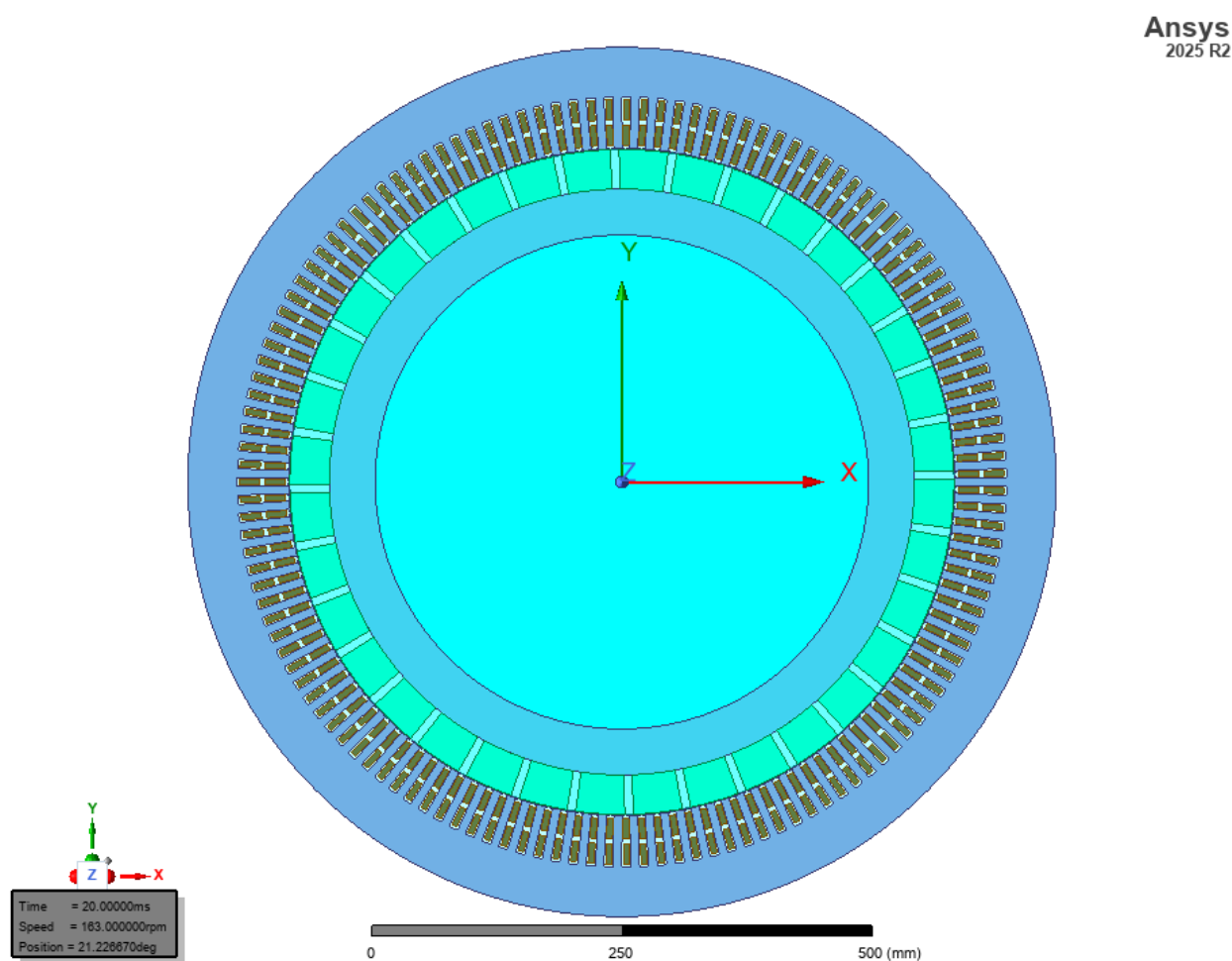


Рисунок 4.1 – Двовимірна модель генератора в ANSYS Maxwell

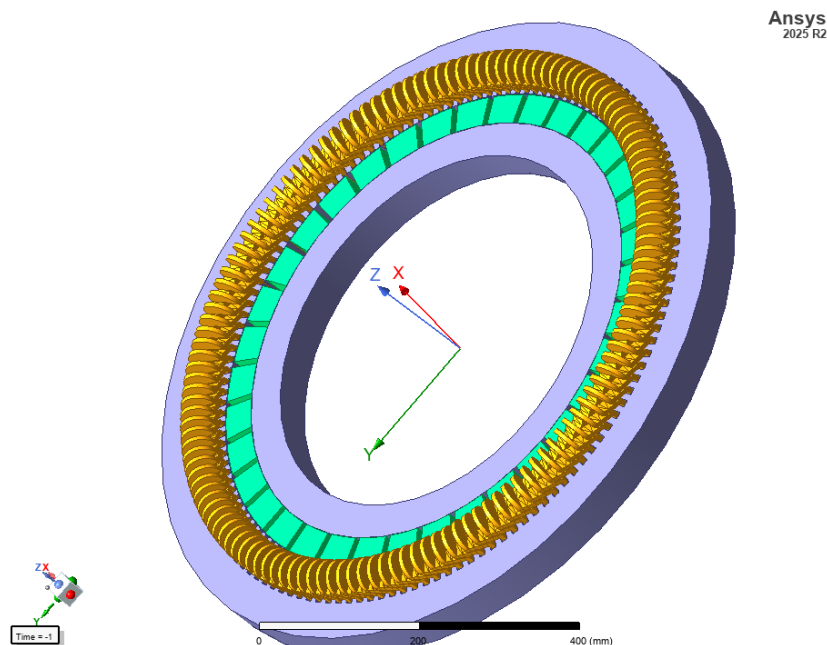


Рисунок 4.2 – Тривимірна модель генератора

Генератор виконаний за схемою зовнішньороторної синхронної машини з поверхневим розташуванням постійних магнітів, де зовнішній ротор обертається навколо нерухомого статора. Подібне рішення поширене у прямоприводних вітрогенераторах малої потужності задля виключення редуктора та збереження надійності при низьких частотах обертання. Просторову геометрію ротора змодельовано і показано на рисунку 4.3, а по пазах обмотки статора розкладено на рисунку 4.4.

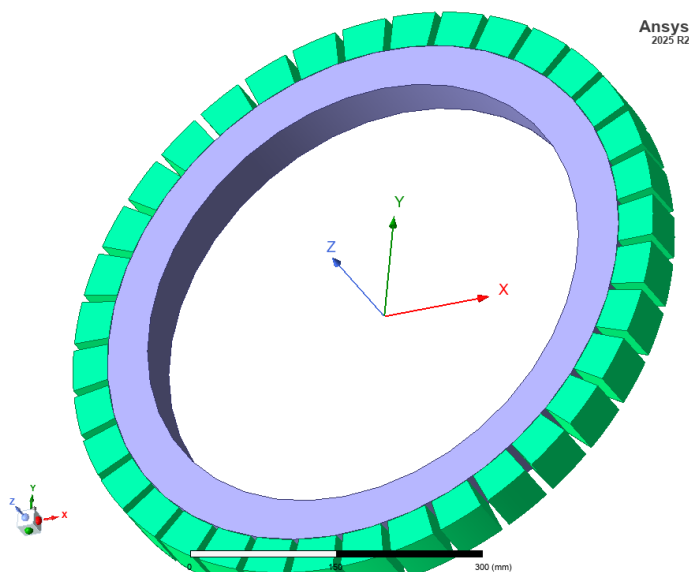


Рисунок 4.3 – Тривимірна модель ротора з постійними магнітами

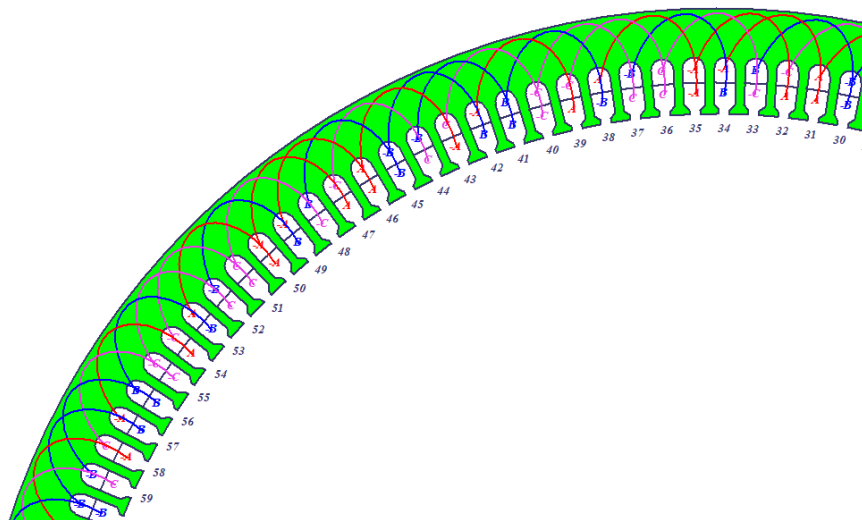


Рисунок 4.4 – Обмотка статора з розкладкою провідників по пазах

Розподіл магнітної індукції при номінальному навантаженні наведено на рисунку 4.5. Кольорова шкала відображає значення від 0 до 2 Тл. Максимальні значення до 3,426 Тл фіксуються в зубцях статора. Саме там відбувається концентрація магнітного потоку. В зоні повітряного зазору індукція стабілізується на рівні $\sim 1,2$ Тл.

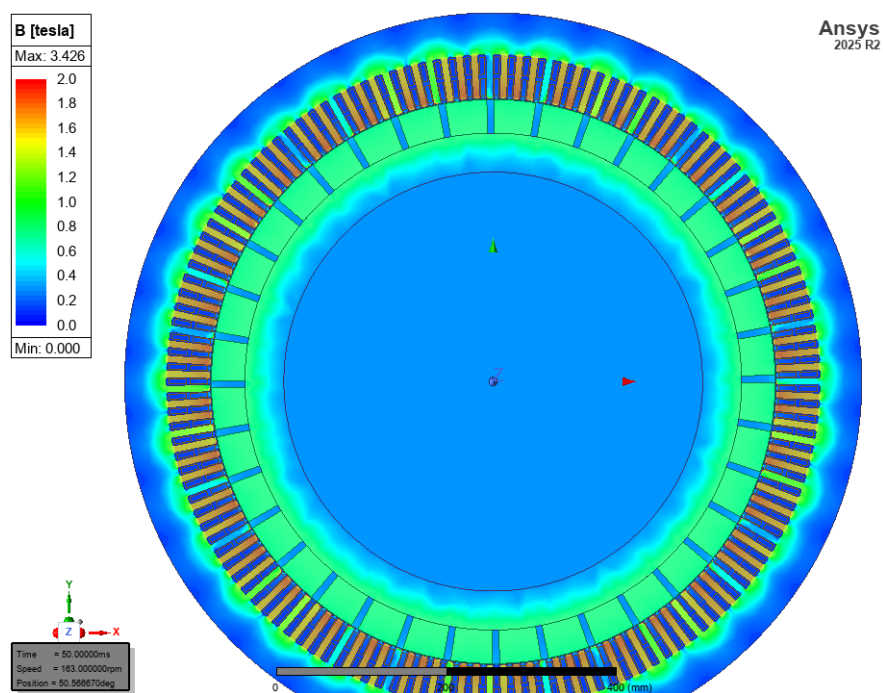


Рисунок 4.5 – Розподіл магнітної індукції в генераторі

Залежність індукції в повітряному зазорі від електричного кута наведена на рисунку 4.6. Форма кривої близька до трапецієподібної з амплітудою близькою до 1,2 Тл. Вказана топологія поля властива конфігураціям із поверхневим розташуванням постійних магнітів у машині.

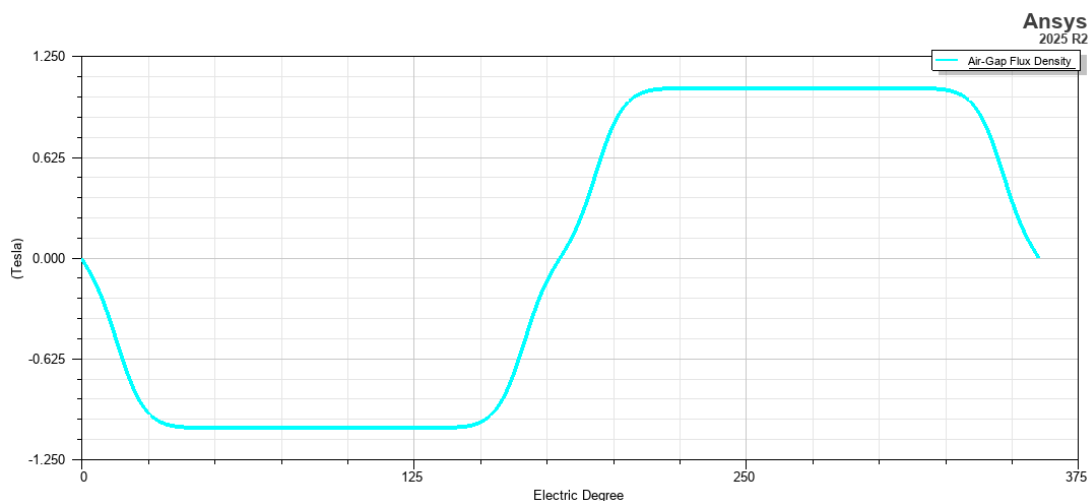


Рисунок 4.6 – Індукція в повітряному зазорі генератора

Графіки фазної та лінійної напруг генератора для номінального режиму роботи при 163 об/хв ілюструє рисунок 4.7. Величина фазної напруги дорівнює 132,8 В, тоді як лінійна напруга має значення приблизно 350 В. Завдяки синусоїдальній формі отриманих кривих підтверджується належна якість формування ЕРС та відсутність значних гармонійних спотворень.

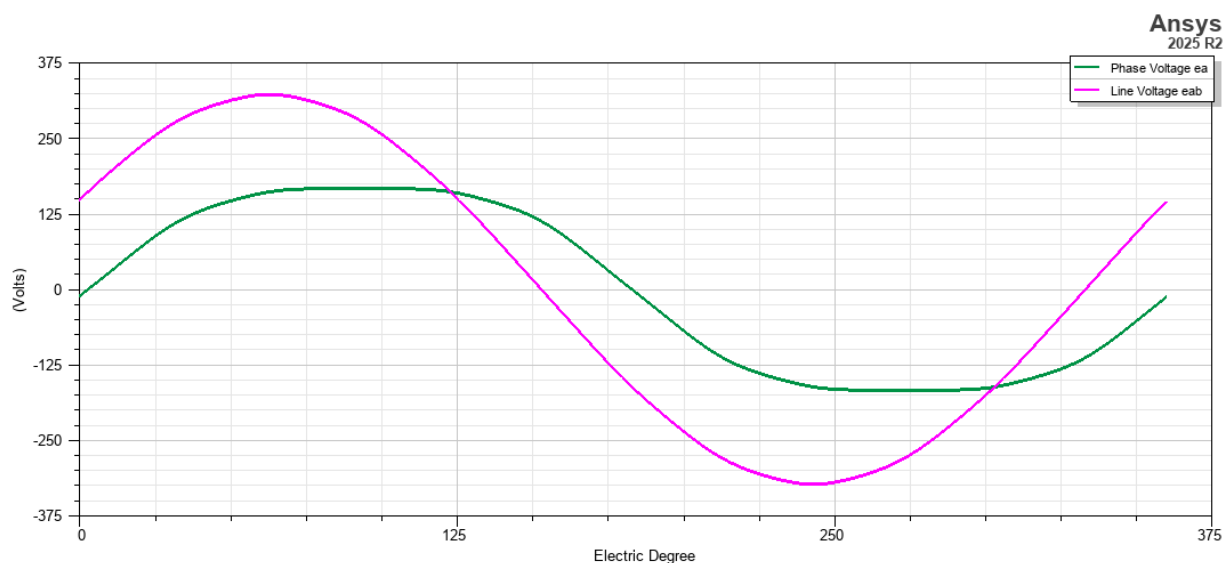


Рисунок 4.7 – Фазна та лінійна напруги на виході генератора

Програма також дозволила візуалізувати коливання струмів у трьох фазах при СГПМ (рис. 4.8). На графіку чітко спостерігається класичний зсув фаз на 120° при діючому значенні струму 28,13 А.

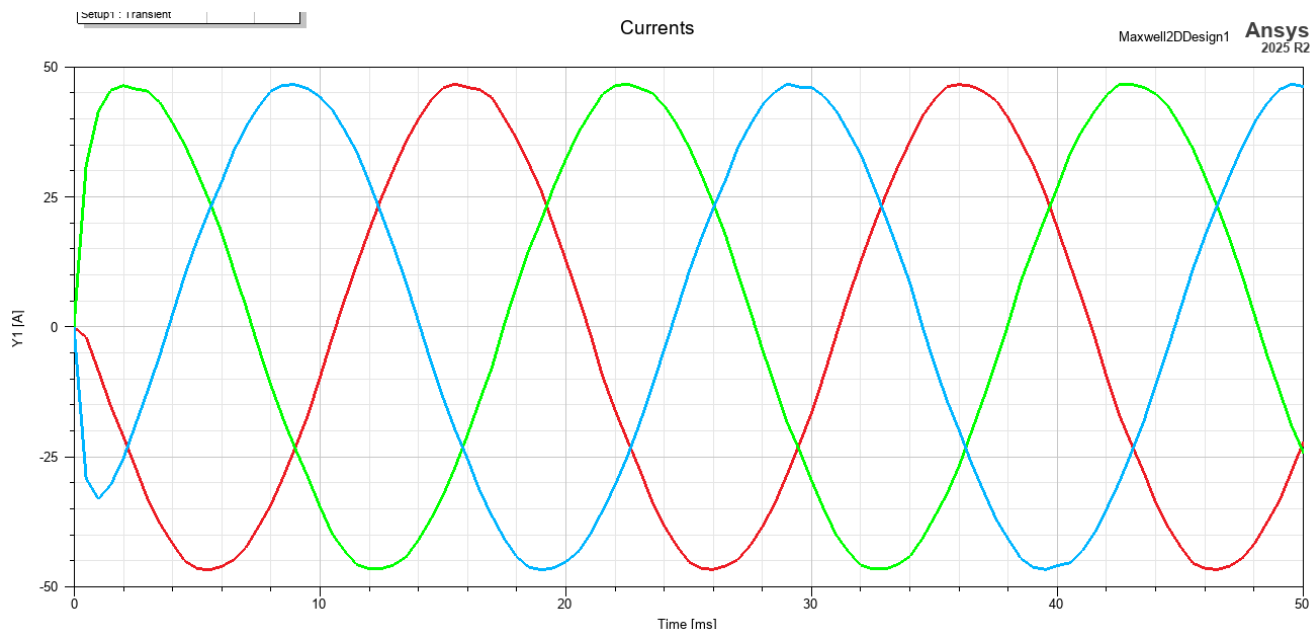


Рисунок 4.8 – Струми у фазах генератора

Момент обертання ротора у часі наведено на рисунку 4.9. Після перехідного процесу в початкові мілісекунди роботи момент стабілізується зі середнім значенням в 620 Н·м.

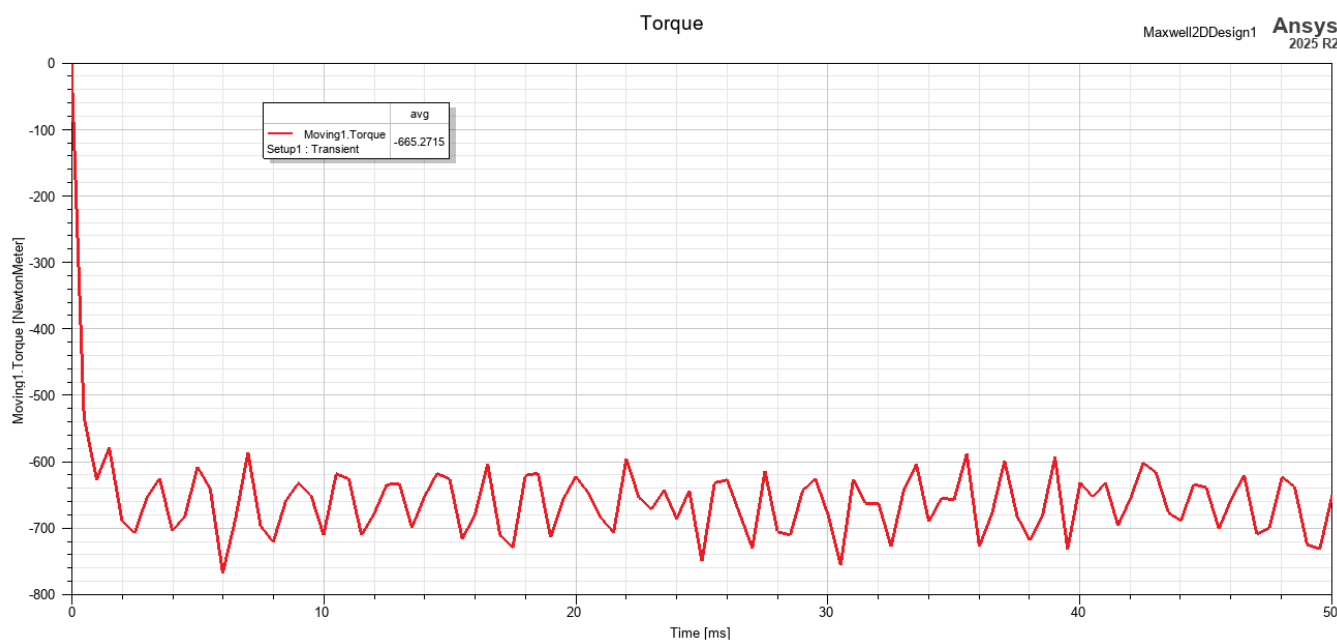


Рисунок 4.9 – Момент обертання ротора генератора

Останнім кроком моделювання стало аналіз коефіцієнта корисної дії. Зображена на рисунку 4.10 крива відображає зміну ККД залежно від кута навантаження. При малих кутах ККД досягає максимального значення в 96% і поступово знижується зі збільшенням кута. Робочий кут навантаження генератора при номінальних умовах обрано 2,56 градуса.

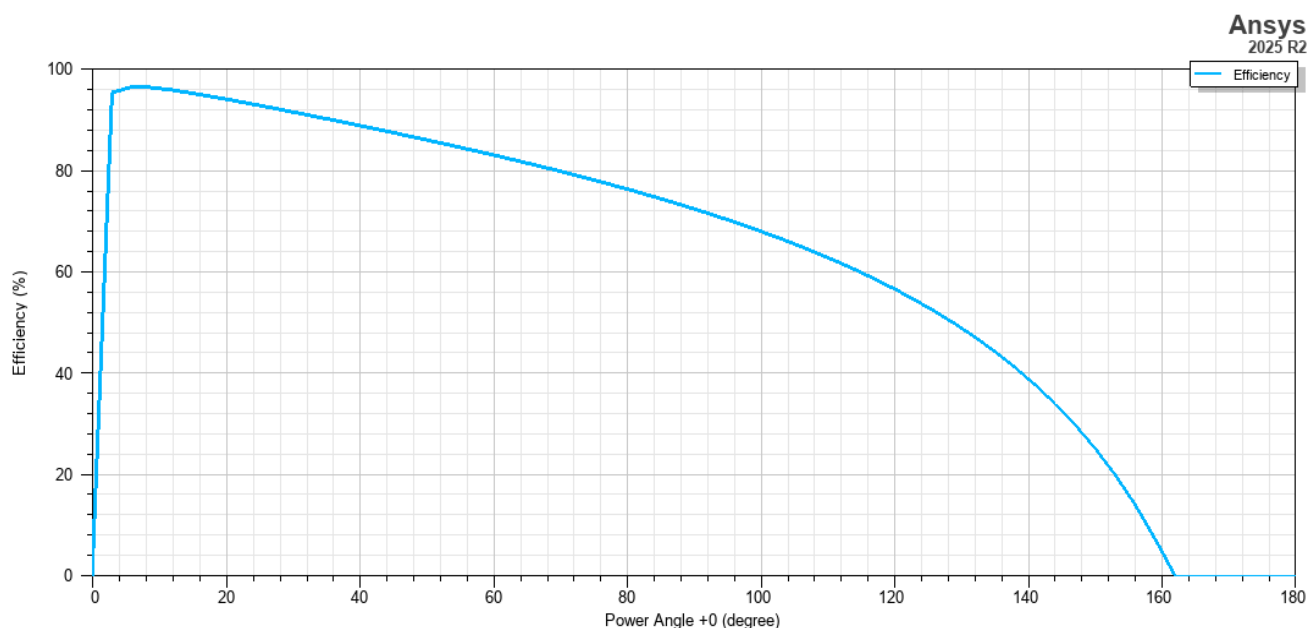


Рисунок 4.10 – ККД генератора залежно від кута навантаження

4.2 Висновки до четвертого розділу

У розділі 4 виконано комп'ютерне моделювання синхронного генератора на постійних магнітах вітроустановки в програмному забезпеченні ANSYS Maxwell.

Розроблені двовимірні та тривимірні графічні моделі генератора повністю передають специфіку конструкції зовнішньороторної машини з поверхневими постійними магнітами.

Зведені параметри генератора за результатами моделювання ANSYS Maxwell наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри генератора за результатами моделювання

Технічний параметр	Значення
1	2
Середньоквадратичне значення лінійного струму (А)	28.1343
Середньоквадратичне значення фазного струму (А)	28.1343
Середньоквадратичне значення фазної напруги (В)	132.787
Теплове навантаження якоря (A^2/mm^3)	11.1986
Питоме електричне навантаження (A/mm^3)	10.7463
Густина струму якоря (A/mm^2)	1.04209
Втратим на тертя та вітророзподіл (Вт)	16.3
Втрати на залізному осерді (Вт)	464.972
Втрати на міді якоря (Вт)	81.5896
Загальні втрати (Вт)	562.862
Вихідна потужність (Вт)	10007.7
Вхідна потужність (Вт)	10570.6
ККД (%)	94.6752
Видима потужність (ВА)	11207.4
Коефіцієнт потужності	0.892961
Синхронна швидкість (об/хв)	163
Номінальний крутний момент (Н·м)	619.275
Кут потужності (градус)	2.56078

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні положення з охорони праці при обслуговуванні вітроенергетичної установки

Обслуговування вітроенергетичної системи котеджу пов'язане з роботою при напрузі до 1000 В. Вітрогенератор, контролер, акумуляторні батареї, інвертор та кабелі утворюють потенційно небезпечну для здоров'я людини єдину електричну систему. Недотримання встановлених вимог при виконанні навіть найпростіших операцій з обслуговування може призвести до важкого травматизму.

Правову основу організації безпечної праці в Україні формує закон [30]. У тексті документу визначаються права та обов'язки працівників і роботодавців, встановлюються державні гарантії в сфері охорони праці.

Технічні вимоги до улаштування та безпечної роботи регламентуються декількома нормативними документами, в яких:

- встановлюються вимоги до конструктивного виконання, вибору обладнання та технічних захисних заходів [31];
- регулюється безпечна робота діючих електроустановок в процесі експлуатації [32];
- встановлює організаційні вимоги до персоналу та порядок виконання робіт [33];
- прописані вимоги протипожежного захисту електроустановок [34].

До роботи в електроустановках допускаються за умов наявності відповідної кваліфікації з електробезпеки. Відповідно до [33, розділ 4] працівники, що обслуговують електроустановки, повинні знати правила безпеки, пройти навчання безпечним прийомам праці на робочому місці та скласти іспит із присвоєнням групи з електробезпеки. Посвідчення працівник зобов'язаний мати під час виконання будь-якої роботи. Особа допускається до роботи якщо їй виповнилось

18 років, вона пройшла медичний огляд, немає протипоказань за станом здоров'я, склала іспит з відповідним рівнем групи електробезпеки.

Нормативний документ встановлює п'ять груп електробезпеки. Кожна визначає рівень знань, практичних навичок та прав персоналу. Мінімальний стаж роботи в електроустановках для отримання кожної групи наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормативний стаж роботи в електроустановках для отримання групи з електробезпеки [33, додаток 1]

Категорія працівників	I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6
Неелектротехнічні працівники (будівельники, водії, прибиральники)	Без нормування	2	12	–	–
Керівники та спеціалісти з вищою технічною/електротехнічною середньою освітою	–	1	2	3	6
Керівники та спеціалісти зі спеціальною профтехосвітою	–	1	2	3	12
Керівники та спеціалісти без спеціальної освіти	–	1	2	6	24
Практиканти вищих та середніх навчальних закладів	–	1	3	–	–
Практиканти профтехучилищ	–	1	6	–	–
Одиниця виміру – місяці. «–» означає, що присвоєння даної групи для цієї категорії не передбачено					

Працівники повинні мати чітке уявлення про небезпеку роботи в електроустановках, знати та вміти застосовувати правила безпеки, знати будову і принцип дії установки, практично вміти надавати першу допомогу потерпілим [33, додаток 1], щоб отримати групи II-V. Для груп III-V вимагається обов'язкове додаткове спеціальне навчання відповідно до займаної посади.

Тому, для самостійного обслуговування системи ВЕУ котеджу необхідна

група не нижче III. Бо робота передбачає обслуговування установки, знання принципової схеми системи, вміння організовувати безпечне виконання роботи. Робота з обслуговування вітрогенератора на висоті 18 м відноситься до верхолазних робіт з підвищеним рівнем небезпеки відповідно до [35, п. 94] і виконується за нарядом-допуском при сприятливих погодних умовах. З огляду на характер верхолазних робіт до їх виконання залучається бригада не менше із двох осіб. Перший працівник безпосередньо виконує роботу на висоті, другий здійснює страхування та нагляд внизу.

5.2 Характеристика електроустановки автономної ВЕУ

Склад вітроенергетичної установки детально розглянуто у п. 3.7. З точки зору охорони праці кожен елемент системи має власні електричні особливості. Вони визначають ступінь небезпеки та порядок безпечного обслуговування.

Вітрогенератор NE-10kG має трифазний синхронний генератор на постійних магнітах потужністю 10 кВт. Його головна небезпека криється в тому, що вихідна напруга присутня на виводах завжди. Достатньо, щоб ротор обертався під дією вітру. Відключення контролера або інвертора не усуне напругу в лінії від генератора. Єдиний надійний спосіб знеструмити ділянку – механічне загальмування ротора з відключенням трифазного роз'єднувача.

Контролер заряду FKJ-B PWM 10 кВт розміщується у котельні та постійно підключений як до генератора так і до акумуляторних батарей. На його вхідних клеммах присутня змінна напруга від генератора, а на вихідних клеммах діє постійна напруга 48 В. Після відключення живлення внутрішні конденсатори контролера зберігають залишковий заряд протягом кількох хвилин. Тому перед початком робіт всередині корпусу обов'язково необхідно впевнитись у відсутності напруги показником напруги відповідно до вимог [32] та дотримуватись вказівок виробника щодо витримки часу після відключення.

П'ять акумуляторних модулів MUST LP21-48300 використовуються як джерело постійного струму напругою 48 В та ємністю 1500 А·год. Не дивлячись на те, що вони мають відносно малу напругу, струм короткого замикання може досягати кількох тисяч ампер. Під час замикання клем миттєво виникає електрична дуга температурою понад 3000 °С, яка здатна спричинити важні опіки та пожежу. Акумулятори залишаються під напругою постійно і не мають засобів ручного відключення, окрім вбудованого BMS та роз'єднувача.

Гібридний інвертор LuxPower LXP LB-12K перетворює постійний струм 48 В від АКБ на змінний 230 В/50 Гц. Вихід інвертора залишається під напругою

230 В незалежно від стану зовнішньої мережі (достатньо мати заряджений акумулятор). Всередині корпусу інвертора розміщені конденсатори великої ємності. Вони зберігають небезпечний заряд ще кілька хвилин після повного відключення живлення. Перед будь-якими роботами всередині корпусу силового обладнання слід витримати паузу після відключення.

Кабельна лінія від вітрогенератора до котельні прокладається під землею. На ділянці від основи опори до котельні кабель перебуває під змінною напругою при обертаючому роторі. Серед найбільш ймовірних аварійних сценаріїв є пошкодження підземної ділянки кабелю при проведенні земляних робіт. У зв'язку з цим, перед земельними роботами на ділянці вимагається перевірити схему прокладання кабелю та позначити трасу на місці.

5.3 Аналіз небезпечних факторів з акцентом на ураження електричним струмом при виконанні електротехнічних робіт

Під час зведення ВЕУ на об'єкті виникають небезпечні виробничі фактори, що поділяються на такі види [36, с. 50]: фізичні (робота на струмовідних частин під робочою напругою, рухомі частини ротора, робота на висоті 18 м, підвищена температура поверхонь обладнання, вплив вітру та атмосферних опадів у прибережній зоні), хімічні (виділення під час зварювальних та паяльних робіт шкідливих газів та аерозолів) та психофізіологічні (перевантаження під час монтажу опори, психоемоційне напруження при верхолазних роботах і роботі в умовах воєнного стану).

Особливої уваги слід першочергово приділити загрозі удару струму. Електричний струм, коли проходить через тіло людини, справляє механічну, електролітичну та біологічну дію [36, с. 166-167]. Механічна дія виявляється у розриві тканин та органів, виникненні опіків на місцях входу і виходу струму. Електролітична дія спричиняє розклад крові, лімфи та інших рідин в організмі з порушенням їх хімічного складу. Біологічна дія збуджує та судомно скорочує

м'язи, наслідком чого може зупинитися серце і дихання.

Ступінь небезпеки ураження електричним струмом залежить від чинників, наведених у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Фактори, що впливають на ступінь ураження струмом [36]

Фактор	Характеристика
1	2
Величина струму	Найвпливовіший фактор. Струм $> 0,05$ А небезпечний, $> 0,1$ А – смертельний.
Тривалість дії	Чим довше, то тим більше шкоди. До 0,1 с відносно безпечно
Шлях струму	Критичну шкоду наносить шлях «рука-рука», «рука-нога»
Рід струму	Змінний 50 Гц струм небезпечніший за постійний при однаковій напрузі
Опір тіла	Сухе тіло 10-100 кОм, вологе 1-3 кОм.
Стан здоров'я	Хворі і втомлені особи більш сприятливі до дії струму

Різні шляхи проходження струму через тіло людини по-різному впливають на наслідки ураження. Найбільш небезпечним є шлях через м'язи, що забезпечують дихання, та серце. Загалом виділяють понад 20 петель струму. Наприклад, «рука-рука» (1), «права рука-ноги» (2), «ліва рука-ноги» (3), «нога-нога» (4), «голова-ноги» (5), «голова-руки» (6) – найпоширеніші з них наведені на рисунку 5.1. Першочергова небезпека пов'язана з траєкторіями «права рука-ноги», «ліва рука-ноги» та «рука-рука», адже у згаданих випадках струм проходить через серце. Відносно безпечним є шлях «нога-нога».

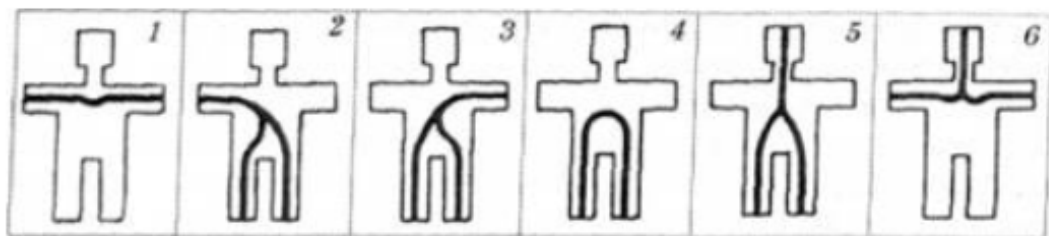


Рисунок 5.1 – Поширені шляхи проходження струму через тіло людини [37]

Залежність наслідків ураження від величини струму наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Дія струму на організм людини [36, с. 171]

Значення струму, мА	Змінний струм	Постійний струм
1	2	3
Менше 0,5	Не відчувається	Не відчувається
0,5 ... 1,5	Легке поколювання пальців рук	Не відчувається
10 ... 15	Больові відчуття в руках, важко керувати м'язами	Відчуття нагрівання шкіри
20 ... 25	Сильний біль, неможливо відірвати руку від провідника, утруднене дихання	Посилення нагрівання, незначні скорочення м'язів
50 ... 80	Параліч дихання, початок фібриляції серця	Сильне нагрівання, судоми, утруднене дихання
Більше 100	Смертельна небезпека	Зупинка дихання

При виконанні обслуговування електроустановки системи ВЕУ імовірним буде однофазне включення, тобто торкання фазного провідника при стоянні на землі або контакті з заземленим корпусом обладнання. На практиці розповсюджена саме така схема [36, с. 173]. В такому випадку через тіло людини прокладається фазна напруга 230 В, а струм проходить від фази через тіло до землі та повертається через заземлення нейтралі. Схема однофазного включення представлена на рисунку 5.2.

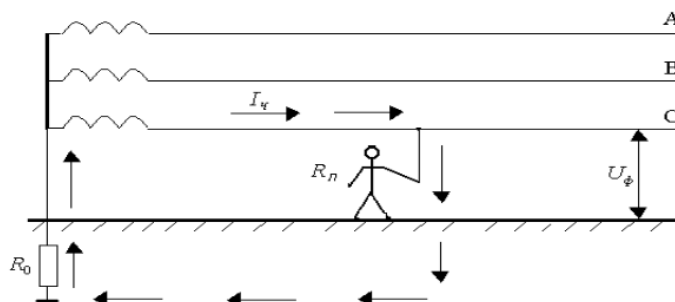


Рисунок 5.2 – Схема однофазного дотику людини до провідника в мережі з глухо заземленою нейтраллю [36]

Змінний струм несе більшу небезпеку, ніж постійний струм тієї самої напруги. Він викликає тетанічне скорочення м'язів, унеможливорює самостійне звільнення від контакту з провідником. Постійний струм від акумуляторного блоку при зниженому опорі людини (вологі руки, пошкоджену шкіру, захворювання) здатен викликати фібриляцію шлуночків серця.

У межах систем ВЕУ котеджу виокремлено перелік ймовірних аварійних ситуацій:

- пошкодження ізоляції підземного кабелю від генератора під час проведення земляних робіт;
- коротке замикання в ланцюзі акумуляторних батарей від випадкового падіння металевого предмета на клеми;
- ураження струмом при обслуговуванні інвертора, контролера без відключення та перевірки відсутності напруги;
- ураження персоналу, який піднімається на опору заввишки 18 м, без дотримання вимог електробезпеки за наявної напруги на лінії від генератора.

5.4 Технічні заходи електробезпеки

Відповідно до [32] перед початком виконання робіт в електроустановках необхідно виконати певну послідовність дій, щоб фізично унеможливити ураження електричним струмом. Першим відключається автоматичний вимикач між виходом інвертора та головним щитом котеджу. Наступним на черзі – трифазний роз'єднувач на лінії від вітрогенератора, який виключається виключно після повної зупинки ротора. На органах керування вивішуються заборонні плакати «Не вмикати! Працюють люди» (рис. 5.3) [33, додаток 8] та витримується пауза для розряду внутрішніх конденсаторів інвертора і контролера.



Рисунок 5.3 – Заборонний плакат «Не вмикати – працюють люди»

Далі виконується перевірка напруги на всіх ділянках двополюсним показчиком напруги до 1000 В. Перевірку пройти мають всі три фази змінного струму на лінії від вітрогенератора та обидва полюси постійного струму на ділянці АКБ.

Захист системи ВЕУ від надструмів та струмів витоку технічно забезпечується автоматичними вимикачами та пристроями захисного відключення. ПЗВ реагує на появу струму витоку на землю. Подібні ознаки можуть вказувати як на пошкодження ізоляції, так і на дотик людини до струмовідних частин. На виході інвертора встановлюється загальний захист від ураження струму у вигляді ПЗВ з уставкою 30 мА. Перелік апаратів захисту та комутації ВЕУ представлено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Апарати захисту та комутації системи ВЕУ

Лінія	Апарат	Номінал	Призначення
1	2	3	4
Генератор – контролер	Трифазний роз'єднувач	63 А / 400 В АС	Відключення генератора при обслуговуванні
Контролер – АКБ	Запобіжник-роз'єднувач	400 А / 80 В DC	Захист від КЗ на DC-шині заряду
АКБ-інвертор	Автоматичний вимикач	315 А / 80 В DC	Захист від КЗ між АКБ та інвертором
Інвертор – щит	Автоматичний вимикач	63 А / 230 В АС	Захист вихідної лінії інвертора
Контур А – споживачі	ПЗВ, автоматичний вимикач	30 мА / 25 А	Захист від витоку та перевантаження
Щитова котельні	ПЗІП клас II	40 кА / 275 В АС	Захист від імпульсних перенапруг

Підбір кабелів з'єднання обладнання системи ВЕУ виконується у три етапи.

1. Визначається розрахунковий переріз провідника з умови допустимої втрати напруги [38, с. 49]:

$$Sp = \frac{I_p \cdot \rho \cdot l}{\Delta U_{\text{доп}}}, \quad (5.1)$$

де I_p – розрахунковий струм ділянки;

$\rho = 0,0017$ Ом·мм²/м – питомий опір міді;

l – довжина ділянки, м;

$\Delta U_{\text{доп}}$ – допустима втрата напруги, В.

Для силової мережі допустима втрата напруги не має перевищувати 5% від номінальної [38, с. 49].

2. Обирається стандартний переріз провідника за умовою [38, с. 49]:

$$S_{\text{ст}} \geq S_p, \quad (5.2)$$

де $S_{\text{ст}}$ – найближчий стандартний переріз провідника, мм².

3. Обраний стандартний переріз провідника перевіряється за умовою допустимого нагріву при протіканні розрахованого струму [39, с. 49]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (5.3)$$

де $I_{\text{доп}}$ – допустимий тривалий струм для вибраного кабелю, марки та умови прокладання, що приймається за довідником [31], А.

Якщо під час розрахунку результат перевищив допустиме значення, то необхідно обрати найближче більше значення з ряду стандартних перерізів і повторити перевірку. Результат вибору кабелів для всіх ділянок ВЕУ наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристика кабельних ліній системи ВЕУ котеджу

Лінія	Марка кабелю	Переріз, мм ²	Довжина, м
1	2	3	4
Генератор – контролер	ВВГнг-LS	3×25	93
Контролер – АКБ	КГ	1×50 (2)	1,5
АКБ-інвертор	КГ	1×50 (2)	1,0
Інвертор – щит	ВВГнг-LS	3×10	3,0

Не менш важливим заходом безпеки є захист від випадкового з’явлення напруги на металевих корпусах обладнання через пошкодження ізоляції. Задля виконання завдання влаштовується захисне заземлення. Відповідно до [39] опір захисного заземлення в мережах до 1000 В має бути меншим за 4 Ом.

Для темно-каштанового залишково-солонцюватого (за механічним складом відноситься до важких суглинків з підвищеним вмістом солей) питомий опір $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [40, с. 29]. Опір одного вертикального електрода:

$$R_{\text{ст}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+l}{4H-l} \right), \quad (5.4)$$

де $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – питомий опір ґрунту;

$l = 3 \text{ м}$ – довжина електрода;

$d = 0,0032 \text{ м}$ – діаметр круглого електрода;

$t = 2 \text{ м}$ – відстань від поверхні землі до середини електрода.

Конструкція контуру заземлення складається з 6 вертикальних електродів із кутової сталі довжиною по 3 м кожен, з'єднаних сталеву смугою. Додатково виконується сольова обробка ґрунту, яка знизить питомий опір до $\rho = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Розрахунковий опір контуру заземлення дорівнює $3,24 \leq 4 \text{ Ом}$. До контуру підключаються усі металеві корпуси системи. Схема контуру заземлення ВЕУ наведена на рисунку 5.4.

Окремо увагу приділено опрацюванню блискавкозахисту. Вітроустановка як висока металева конструкція на відкритій місцевості вразлива до ударів блискавки. Згідно з [42] до 80% усіх пошкоджень вітротурбін пов'язані з грозовою активністю. Основними зонами ураження є лопаті ротора, корпус генератора та силові кабелі. Вибраний у таблиці 5.4 ПЗІП класу II захищає від імпульсних перенапруг.

Розміщення ВЕУ на ділянці котеджу, траса підземного кабелю від вітрогенератора через кабельний колодязь КК-1 до котельні, контур заземлення наведено на рисунку 5.5.

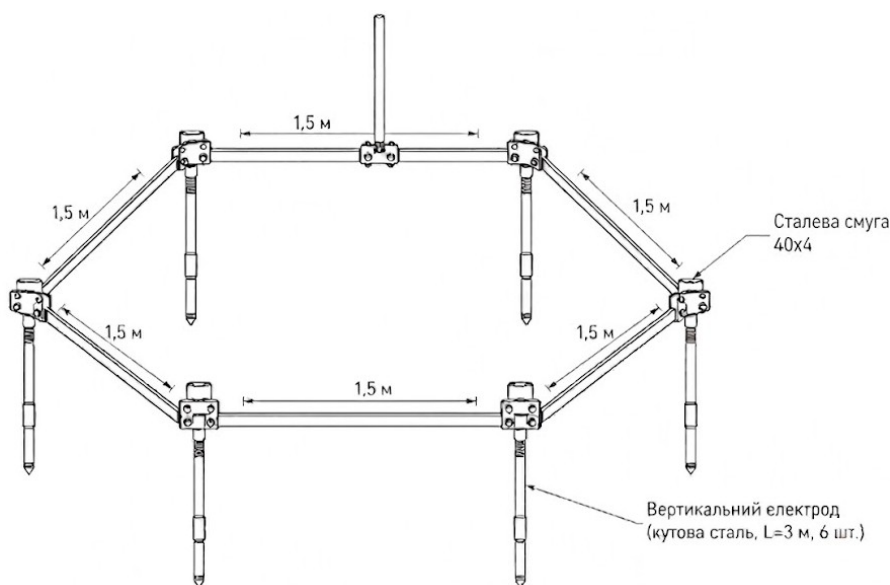


Рисунок 5.4 – Схема контуру заземлення

В трифазній системі із глухозаземленою нейтраллю для забезпечення безпеки передбачено занулення. Так створюється штучний електричний контакт між металевими елементами конструкцій, які зазвичай не несуть струму, та нульовим дротом. Коли відбувається руйнація ізоляційного шару, сформоване коло забезпечить проходження струму з малим опором. Як наслідок, автоматичний вимикач миттєво спрацює [36].

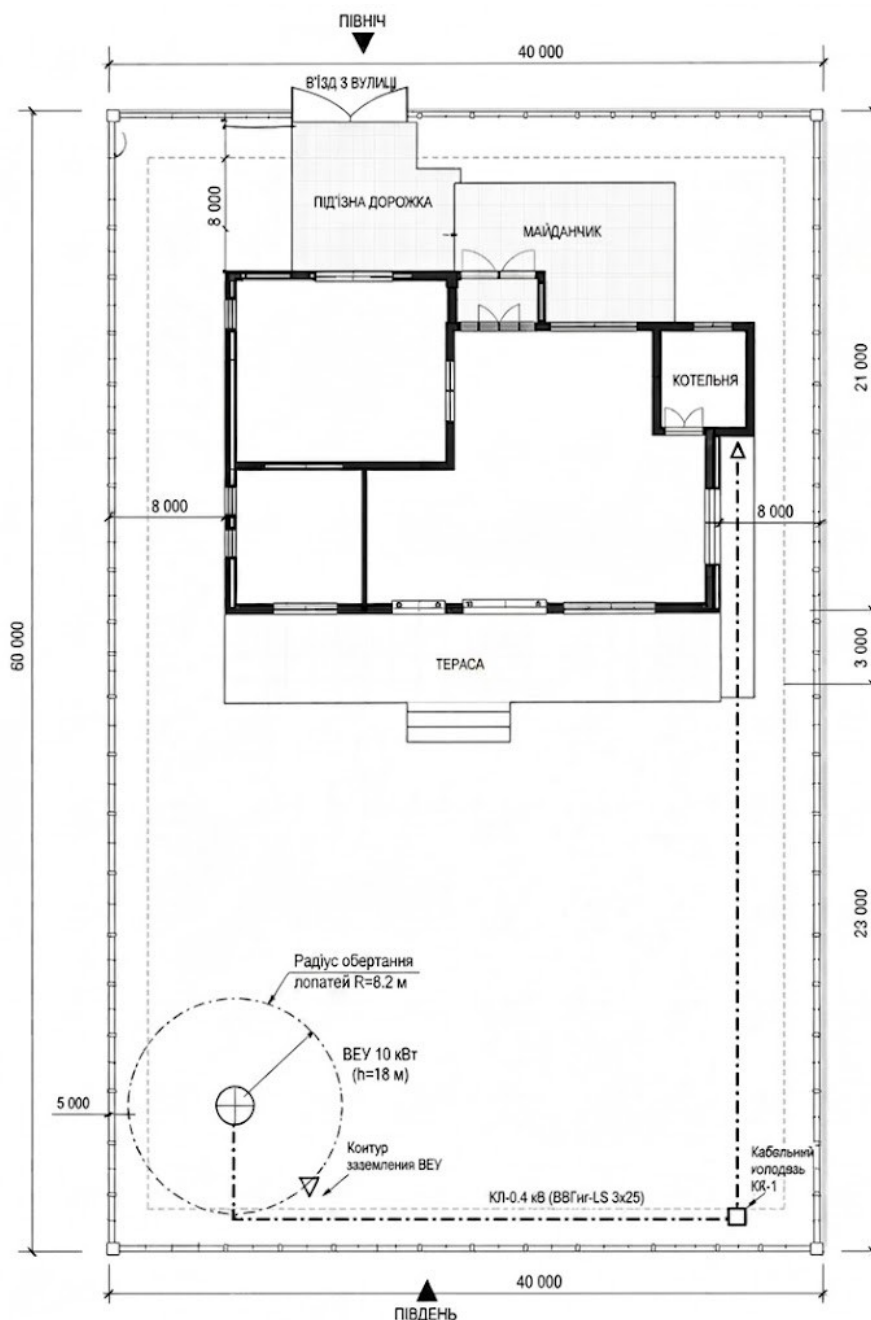


Рисунок 5.5 – План ділянки з розміщенням ВЕУ, кабельною трасою та контуром заземлення

5.5 Засоби індивідуального захисту

Електрозахисні засоби поділяються на основні та додаткові. Основні витримують робочу напругу електроустановки та дозволяють торкатися струмовідних частин. Додаткові самотійно не забезпечують захист від ураження струмом, але підсилюють дію основних засобів. Їх застосування можливе виключно з основними засобами [42, п. 4.10].

До основних електрозахисних засобів відносять ізоляційні штанги (а), покажчики напруг (б), електровимірювальні кліщі (в), діелектричні рукавички (г) та інструменти з ізольованими рукоятками (е). До додаткових засобів електрозахисту належать діелектричні боти та калоші (г), гумові килимки та доріжки (г), ізолювальні підставки (д), переносне заземлення, огорожжувальні плакати та знаки безпеки [42, п. 4.10]. Засоби індивідуального захисту при роботі в електроустановках наведено на рисунку 5.6.

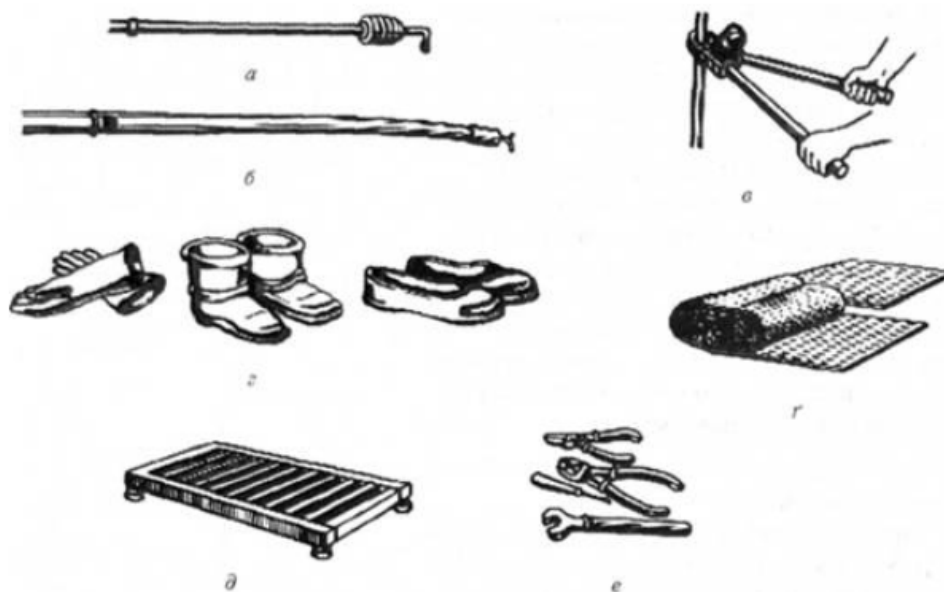


Рисунок 5.6 – Засоби захисту при роботі в електроустановках до 1000 В [37, п. 3.4]

Кожен засіб захисту перед використанням має пройти обов'язковий огляд. Перевіряється цілісність ізоляції, відсутність механічних пошкоджень і

відповідність строку чергового випробування. Використовувати засоби захисту з простроченим строком випробування або видимим пошкодженням категорично забороняється.

При роботах на опорі вітрогенератора висотою 18 м обов'язковим також є застосування повного комплекту захисної екіпіровки, наведеної в таблиці 5.6 [43].

Таблиця 5.6 – Захисна екіпіровка для висотних робіт на опорі ВЕУ

Засіб захисту	Призначення
1	2
Страхувальний пояс	Захист від падіння з висоти, перевіряється перед кожним підйомом
Захисна каска	Захист голови від падіння предметів та ударів об конструкцію
Захисні рукавиці	Захист від порізів та мозолів при роботі з металевими частинами
Робочу взуття з протиковзною підошвою	Стійке положення при підйомі по опорі
Вітрозахисний та водовідштовхувальний одяг	Захист від погодних умов в прибережній зоні

Виконання робіт на висоті без повного комплекту захисної екіпіровки категорично забороняється.

5.6 Пожежна безпека автономної вітроенергетичної установки

Статистика щодо причин виникнення пожеж у виробничій сфері відображає факт, що близько 20-22% випадків пов'язані з несправностями електроустаткування (рисунок 5.7) [37, п. 4.1].

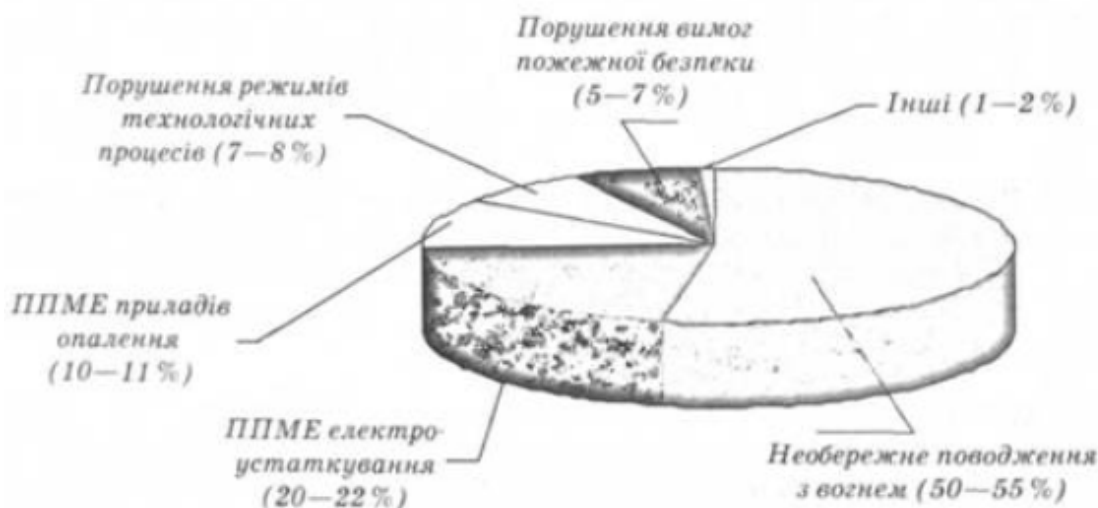


Рисунок 5.7 – Основні причини виникнення пожеж у виробничій сфері [37, п. 4.1].

До основних причин виникнення пожежі в електроустановках належить [44]:

- перевантаження електромережі за відсутності захисту належного рівня;
- коротке замикання внаслідок пошкодження обладнання або кабельних ліній;
- несправності технологічного обладнання;
- пошкодження допоміжних електромереж;
- порушення правил експлуатації через людський фактор.

Окремим чинником небезпеки є те, що під час пожежі в електроустановці не завжди вдається знеструмити охоплену вогнем ділянку. Тому персонал, що обслуговує ВЕУ, повинен чітко розуміти яким чином та якими засобами слід ліквідувати осередок займання[44].

Ліквідація займань в електроустановках, що не перебувають під напругою, допускається за допомогою піску, води та вогнегасників будь-яких марок. Якщо

електроустановка перебуває під напругою до 1000 В, дозволяється використовувати лише вогнегасники порошкового, аерозольного або вуглекислого типу [44].

У котельні, де розміщено обладнання ВЕУ, встановлюється щонайменше один вогнегасник ВВК-5.

5.7 Заходи безпеки в умовах воєнного стану

Зважаючи на воєнний стан в країні, робота з обслуговування ВЕУ супроводжується ризиком обстрілів. Як тільки лунає сирена повітряної тривоги, усі працівники мають відразу пройти в укриття. Повернутися до виконання роботи вони зможуть лише після того, як буде оголошено відбій. Розташування найближчих укриттів у с. Фонтанка представлено на рисунку 5.8 [45].

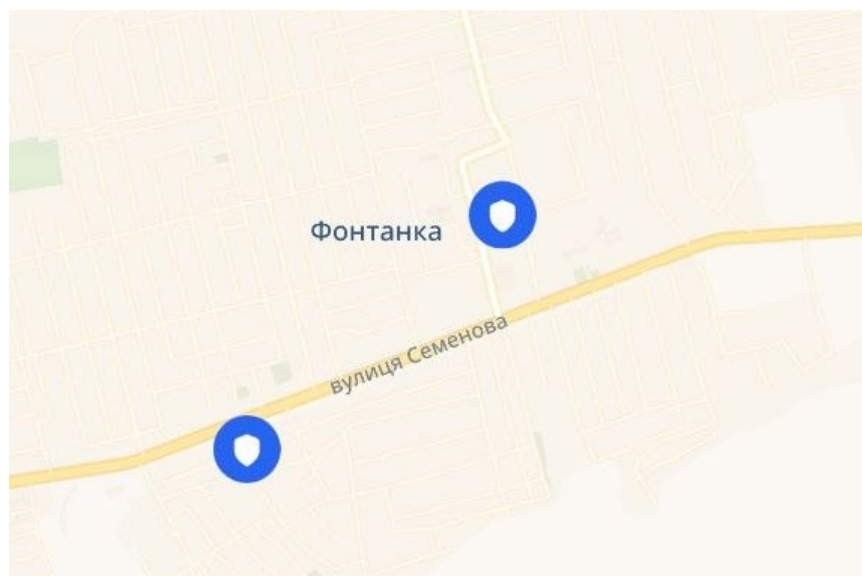


Рисунок 5.8 – Розташування найближчих укриттів у с. Фонтанка Одеської області, в які мають пройти працівники при оголошенні повітряної тривоги

5.8 Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом

Швидкість та послідовність дій у разі електротравми визначає результат порятунку людини [37, с. 186]. Реанімаційні заходи при ураженні електричним струмом розпочинаються негайно, шляхом надання домедичної допомоги без очікування медичного персоналу.

Першим кроком є звільнення потерпілого від дії струму. Вимикається рубильник, автоматичний вимикач або роз'єднувач. Якщо швидке відключення неможливе, то потерпілого відтягують від провідника за сухий одяг або за допомогою діелектричних рукавичок, палиці, мотузки. Торкатись тіла потерпілого голими руками, поки він перебуває під напругою, забороняється.

Паралельно з наданням допомоги викликається швидка медична допомога за номером 103 або 112.

Після звільнення від струму визначається стан потерпілого. Перевіряється наявність свідомості, дихання, пульсу на сонній артерії. Про відсутність кровообігу може свідчити розширені зіниці. Перевірка стану виконується протягом 15-20 секунд [37, с. 186]. Залежно від стану потерпілого виконуються відповідні заходи що наведені в таблиці 5.7.

При стані III негайно розпочинається серцево-легенева реанімація. Потерпілого укладають на тверду рівну поверхню та звільняють груди від одягу. Виконуються натискання на грудину з глибиною 3-5 см чергуючись з вдихами штучного дихання методом «рот до рота». Голову потерпілого максимально закидають назад для забезпечення прохідності дихальних шляхів. Реанімація продовжується до прибуття медиків або відновлення самостійного дихання та пульсу [37, с. 186-187].

5.9 Висновки до п'ятого розділу

У 5 розділі визначено та розроблено комплекс заходів з охорони праці при обслуговуванні вітроенергетичної системи котеджу в мережах до 1000 В.

Представлено нормативну базу, що регулює безпечну роботу з електроустановками. Встановлені вимоги до персоналу для самостійного обслуговування ВЕУ: необхідна група з електробезпеки не нижче III, для робіт на висоті 18 м – наряд-допуск та бригада не менш, ніж з двох осіб.

Виявлено специфічні небезпечні фактори системи ВЕУ та порядок виконання технічних заходів безпеки перед початком роботи.

Проведений вибір захисного обладнання та розраховано контур заземлення з 6 вертикальних електродів довжиною по 3 м кожний.

Питання пожежної безпеки, засоби індивідуального захисту для висотних робіт, заходів безпеки у час воєнного стану та алгоритм надання допомоги при ураженні струмом завершують комплекс заходів розділу 5.

ВИСНОВКИ

У представленому проєкті розроблену малу автономну вітроенергетичну систему для двоповерхового котеджу в с. Фонтанка Одеської області. Замість повної відмови від зовнішньої мережі реалізовано ідею створення незалежного контуру живлення теплового насоса, водопостачання, вентиляції та інших важливих приладів власним джерелом енергії. Тепер найголовніші функції котеджу захищені від перебоїв електропостачання.

З доступних на ринку горизонтально-осьових установок обрано вітрогенератор з антикорозійним покриттям, що витримає морський клімат. Обчислення аеродинамічних параметрів продемонструвало здатність установки стабільно генерувати потужність задля виконання запланованих технічних завдань. Узгодження параметрів ротора завершилося підбором синхронного генератора на постійних магнітах. Висота, конструкція опори обґрунтовані з урахуванням вітрового навантаження, правил розміщення щодо перешкод.

Окремо в межах четвертого розділу перевірено розраховані параметри СГПМ шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі ANSYS Maxwell

Повноцінна робота всієї системи можлива завдяки підібраним комплектом обладнанням у складі гібридного інвертора, контролера заряду з баластним навантаженням та акумуляторних модулів. Конфігурація акумуляторного вузла розрахована на автономну роботу понад доби без вітру взимку та майже дві доби влітку. ВЕУ забезпечить живлення протягом року, а в період зниженої генерації передбачено гнучке управління навантаженням.

Питання безпечної експлуатації системи вирішені на рівні проєктних рішень від вибору перерізів кабелів і номіналів захисних апаратів до розрахунку заземлення. Розділ охорони праці охоплює як технічні заходи, так і дії персоналу при ураженні електричним струмом, виникненні пожежі і виконанні роботи на висоті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Півняк та ін. ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д. : НГУ, 2015. 335 с.
2. Альтернативні енергоресурси. Вступ до спеціальності : навч. посібник / С. В. Бойченко та ін. ; за заг. ред. С. В. Бойченка. К. : НАУ, 2021. 397 с.
3. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії : навч. посібник / М. С. Сегеда, М. Й. Олійник, О. Б. Дудурич. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2019. 204 с.
4. Олійник Ю. С., Лисяк Г. М., Дудурич О. Б. Енергоощадність та альтернативні джерела енергії : навч. посібник. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2020. 312 с.
5. Клименко В. В. та ін. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : монографія. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. 215 с.
6. Корендій В. М., Зінько Р. В. Аналіз переваг і недоліків горизонтально-осьових вітроустановок. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2012. Вип. 729. С. 53–58. URL: <https://science.lpnu.ua/uk/sppo/vsi-vypusky/volume-729-2012/analiz-perevag-i-nedolikiv-goryzontalno-osovyh-vitroustanovok>.
7. Wind Power System. Energor Renewable Energy : веб-сайт. URL: <http://www.energor.com/Wind%20Power%20System.html>.
8. Вітрова енергетика: потенціал та реалізація в Україні. Energosvoboda : веб-сайт. URL: <https://energosvoboda.com.ua/vitrova-energetyka-potenczial-ta-realizacziya-v-ukrayini/>.
9. Говоров П. П., Перепечений В. О., Говоров В. П. Освітлювальні електричні системи та мережі : навч. посіб. Харків : Харк. нац. акад. міськ. госп-ва, 2009. 227 с. URL: https://eprints.kname.edu.ua/12337/1/%D0%9D%D0%9F_%D0%9E%D0%84%D0%A1%D0%9C_%D0%BA_%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B8_9.09.pdf.
10. Global Wind Atlas : веб-сайт. URL: <https://globalwindatlas.info/en/>.

11. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія : нац. стандарт України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. URL: <https://finance.smr.gov.ua/files/%D0%95%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F/dstu-n-b-v11-27-2010-budivelna-klimatologiya.pdf>.
12. Горизонтальний вітрогенератор 10 кВт, 380vac. Sealing : веб-сайт. URL: <https://sealing.com.ua/ua/alternative-energetics-generators/wind-turbines/horizontal-wind-turbines/gorizontalniy-v-trogenerator-10-kvt-380vac/>.
13. R&X Energy. Каталог горизонтальних вітрогенераторів серії G. BTS Engineering : веб-сайт. URL: https://bts.net.ua/wa-data/public/site/docs/R&X-Energy_Catalog_Horizontal-Wind_Turbine.pdf?v65.
14. Горизонтальний вітрогенератор NE-10kG 10 кВт. HYDROLIDER : веб-сайт. URL: <https://hydrolider.com.ua/ua/p1731879936-gorizontalnyj-vetrogenerator-10kg.html>.
15. 10kw Pitch Controlled Aerogenerator Wind Generator NE-10kG. Jiangsu Naier Wind Power Co., Ltd. Made-in-China : веб-сайт. URL: <https://wxnaiermic.en.made-in-china.com/product/LQDYfCTVvEWy/China-10kw-Pitch-Controlled-China-Micro-Hotsale-Aerogenerator-Wind-Generator-Manufacturer.html>.
16. NACA 4412 airfoil. Airfoil Tools : веб-сайт. URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il>.
17. Відновлювані джерела енергії : монографія / за заг. ред. С. О. Кудрі. 3-тє вид., оновл. Київ : Ін-т відновлюваної енергетики НАНУ, 2025. 512 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vidnovliuvani_Djerela_Monography_2025.pdf.
18. Вивчення параметрів вітроенергоустановок : метод. вказівки для студентів спец. 133 «Галузеве машинобудування» ОС Бакалавр. Мелітополь : ТДАТУ, 2017. 28 с. URL: <https://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/vyvchennja-parametriv-vitroenerhoustanovok.pdf>.
19. Wind Turbine Tip Speed Ratio. REUK.co.uk : веб-сайт. URL: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-turbine-tip-speed-ratio/>.

20. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту «Проектування вітроенергетичної установки» із навчальної дисципліни «Вітроенергетика» / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, С. І. Корнелюк. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 97 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/55995/1/2020%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%20209%D0%9C.pdf>.

21. Іванов О. Б. Проектування трифазного синхронного генератора з постійними магнітами : навч.-метод. посіб. Д. : Нац. гірн. ун-т, 2016. 45 с.

22. Kirubadevi S., Sutha S. PMSG Based Wind Energy Conversion System Using Intelligent MPPT with HGRSC Converter. Intelligent Automation & Soft Computing. 2022. Vol. 34, no. 2. P. 1197–1214. URL: <https://www.techscience.com/iasc/v34n2/47645/html>.

23. Гібридний інвертор Hybrid LuxPower LXP-LB-12K Hybrid. Watt : веб-сайт. URL: <https://watt.net.ua/invertori/g%D1%96bridnij-sonjachnij-%D1%96nvertor--hybrid--luxpower-lxp-lb-12k-hybrid.html>.

24. FKJ-B PWM Wind Solar Hybrid Controller. Deming Power : веб-сайт. URL: <http://m.demingpower.com/en/h-pd-27.html>.

25. Порівняльні характеристики літій-іонних та свинцево-кислотних акумуляторів. Jungheinrich Ukraine : веб-сайт. URL: <https://shop.jungheinrich.ua/blog/post/porivnialni-kharakterystyky-litii-ionnykh-ta-svyntsevo-kyslotnykh-akumuliatoriv-7.html>.

26. MUST LP21-48300. Світ АКБ : веб-сайт. URL: <https://svitakb.ua/ua/alternativnaya-energetika/battery-modules/must-lp21-48300>.

27. Operating & Installation Manual. 10kW Wind Turbine System. Scribd : веб-сайт. URL: <https://ru.scribd.com/document/746211034/10KW-Manual>.

28. Карта ґрунтів України. Superagronom : веб-сайт. URL: <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy>.

29. Герасименко О. С., Трикоз Л. В. Методичні вказівки до виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Механіка ґрунтів, основи та фундаменти». Харків : УкрДУЗТ, 2021. 44 с. URL:

<http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5729/1/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D0%B2%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D1%96%D0%B2%D0%BA%D0%B8.pdf>.

30. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.

31. Правила улаштування електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758.

32. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Держ. комітету України по нагляду за охороною праці від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>.

33. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок : наказ Держ. комітету України по нагляду за охороною праці від 06.10.1997 № 257. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98#Text>.

34. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні : наказ М-ва внутр. справ України від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text>.

35. НПАОП 0.00-4.12-2005. Перелік робіт з підвищеною небезпекою : наказ Держ. комітету України з нагляду за охороною праці від 26.01.2005 № 15. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0232-05#Text>.

36. Серіков Я. О. Основи охорони праці : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2007. 227 с.

37. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. 5-те вид., допов. Київ : Знання, 2014. 373 с. URL: https://pidru4niki.com/1066091438322/bzhd/chinniki_vplivayut_naslidki_urazhennya_elektrichnim_strumom.

38. Фащевська Т. М. Теоретичні основи електротехніки : конспект лекцій. Ч. 1. Запоріжжя : Запорізький електротехн. коледж ЗНТУ, 2011. 142 с. URL: <https://studfile.net/preview/5082617/>.

39. Запорожець О. І., Протоєрейський О. С., Франчук Г. М., Боровик І. М.

Основи охорони праці : підручник. Київ : Центр учб. літ., 2009. 264 с. URL: https://pidru4niki.com/16850303/bzhd/zahisne_zazemlennya_elektroustanovok.

40. Яскілка В. Я., Олійник М. З. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Охорона праці в галузі». Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2016. 80 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17890/1/Metodychka_14_%28Vidnovleno%29.pdf.

41. Блискавкозахист вітрогенераторів. ENEL : веб-сайт. URL: <https://enel-ukraine.com.ua/ua/articles/bliskavkozaxist-vitrogeneratoriv-4064>.

42. Винокурова Л. Е., Васильчук М. В., Гаман М. В. Основи охорони праці : навч. посіб. Київ : Факт, 2005. 344 с.

43. Висотні роботи у вітроенергетиці: специфіка, ризики та професійне спорядження. ALP.com.ua : веб-сайт. 2024. URL: <https://alp.com.ua/vysotni-roboty-u-vitroenerhetytsi-spetsyfika-ryzyky-ta-profesiine-sporiadzhennia-blog/>.

44. Особливості гасіння пожежі в електроустановках до 1000 В. ES-101 : веб-сайт. URL: <https://es-101.com/ua/osobennosti-tusheniya-pozhara-v-elektroustanovkakh-do-1000v/>.

45. Щодо найпростіших укриттів на території Фонтанської ОТГ. Фонтанська сільська рада : веб-сайт. 2023. URL: <https://fontanska-rada.gov.ua/shhodo-najprostishih-ukrittiv-na-teritoriyi-fontanskoyi-otg/>.

46. Правила надання першої допомоги при ураженні електричним струмом. Львівський ДСП : веб-сайт. URL: <https://lviv.dsp.gov.ua/pravyla-nadannia-pershoi-dopomohy-pry-u/10723/>.

47. Вовченко Н. О., Гатауллін Р. Г., Дев'ятий С. М. Методичні рекомендації щодо оформлення консультаційних пунктів з питань цивільного захисту. Вінниця : Навч.-метод. центр цивіл. захисту та безпеки життєдіяльності Вінниц. обл., 2011. 69 с. URL: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/2/1/7/0/metodicni-rekomendaciyi-shhodo-oformlennia-konsultaciinix-punktiv.pdf>.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Параметри синхронного генератора на постійних магнітах за результатами розрахунку ANSYS Maxwell

Параметр	Значення
ЗАГАЛЬНІ ДАНІ	
Номінальна вихідна потужність (кВт)	10
Номінальний коефіцієнт потужності	1
Тип коефіцієнта потужності	Індуктивний (Inductive)
Номінальна напруга (В)	230
Кількість полюсів	36
Частота (Гц)	48.9
Втрати на тертя (Вт)	16.3
Втрати на вентиляцію (Вт)	0
Положення ротора	Внутрішній (Inner)
Робоча температура (°C)	40
Тип схеми	Y3
Тип роботи	Потужна мережа / Шини нескінченної потужності (Infinite Bus)
Область	Частота (Frequency)
ДАНІ СТАТОРА	
Кількість пазів статора	135
Зовнішній діаметр статора (мм)	880
Внутрішній діаметр статора (мм)	675
Тип паза статора	3
Паз статора hs0 (мм)	0.5
Паз статора hs1 (мм)	0.5
Паз статора hs2 (мм)	50
Паз статора bs0 (мм)	2.5
Паз статора bs1 (мм)	7.25494
Паз статора bs2 (мм)	9.58247
Паз статора rs (мм)	1.5
Ширина зубця вгорі (мм)	8.5
Ширина зубця внизу (мм)	8.5
Ширина скосу (кількість пазів)	0
Довжина осердя статора (мм)	100
Коефіцієнт заповнення (шихтування) осердя статора	0.96
Тип сталі	steel_2212

Продовження таблиці А.1

Розрахункова товщина клина (мм)	0.499999
Товщина ізоляції паза (мм)	0.3
Товщина міжшарової ізоляції (мм)	0.3
Коригування лобової довжини (мм)	5
Кількість паралельних гілок	1
Кількість провідників у пазу	6
Кількість шарів	2
Тип обмотки	Суцільнокотушкова (Whole Coiled)
Середній крок котушки	3
Кількість елементарних провідників (жил) у провіднику	22
Діаметр дроту (мм)	1.25
Товщина ізоляції дроту (мм)	0.18
Площа паза (мм ²)	438.032
Чиста (корисна) площа паза (мм ²)	394.248
Граничний коефіцієнт заповнення паза (%)	71
Коефіцієнт заповнення паза статора (%)	68.4662
Довжина напіввитка котушки (мм)	178.479
ДАНІ РОТОРА	
Мінімальний повітряний зазор (мм)	1
Внутрішній діаметр (мм)	500
Довжина ротора (мм)	100
Коефіцієнт заповнення (шихтування) залізного осердя	0.96
Тип сталі	steel 2212
Радіус полюсної дуги (мм)	336.5
Механічний коефіцієнт покриття полюса	0.85
Електричний коефіцієнт покриття полюса	0.843811
Максимальна товщина магніту (мм)	40
Ширина магніту (мм)	46.9537
Тип магніту	NdFe35
Тип ротора	1
Магнітний вал	Hi (No)
ДАНІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ	
Залишкова магнітна індукція (Тесла)	1.23
Коерцитивна сила (ка/м)	890
Максимальна густина енергії (кДж/м ³)	273.675

Продовження таблиці А.1

Відносна магнітна проникність повернення	1.09981
Магнітна індукція розмагнічування (Тесла)	1.02437
Залишкова магнітна індукція повернення (Тесла)	1.23
Коерцитивна сила повернення (кА/м)	890
ДАНІ КОРИСТУВАЧА	
Частки	1
ВИТРАТА МАТЕРІАЛІВ	
Густина міді якоря (кг/м³)	8900
Густина постійного магніту (кг/м³)	7400
Густина сталі осердя якоря (кг/м³)	7872
Густина сталі осердя ротора (кг/м³)	7872
Вага міді якоря (кг)	34.7372
Вага постійних магнітів (кг)	50.0339
Вага сталі осердя якоря (кг)	144.516
Вага сталі осердя ротора (кг)	60.3322
Загальна чиста вага (кг)	289.619
Витрата сталі осердя якоря (кг)	378.387
Витрата сталі осердя ротора (кг)	210.833
ПАРАМЕТРИ СТАЛОГО РЕЖИМУ	
Обмотковий коефіцієнт статора	0.909854
Реактивний опір по поздовжній осі X_{ad} (Ом)	0.0280697
Реактивний опір по поперечній осі X_{aq} (Ом)	0.0280697
Реактивний опір по поздовжній осі $X_1 + X_{ad}$ (Ом)	0.217118
Реактивний опір по поперечній осі $X_1 + X_{aq}$ (Ом)	0.217118
Індуктивний опір розсіяння якоря X_1 (Ом)	0.189048
Індуктивний опір пазового розсіяння X_{s1} (Ом)	0.16655
Індуктивний опір лобового розсіяння X_{el} (Ом)	0.020302
Індуктивний опір диференціального (гармонічного) розсіяння X_{d1} (Гн)	0.00219654

Продовження таблиці А.1

Реактивний опір нульової послідовності X_0 (Ом)	0.117456
Активний опір фази якоря R_1 (Ом)	0.0343597
Активний опір фази якоря при 20С (Ом)	0.0318608
МАГНІТНІ ДАНІ ХОЛОСТОГО ХОДУ	
Магнітна індукція в зубцях статора (Тесла)	2.06308
Магнітна індукція в ярмі статора (Тесла)	0.549401
Магнітна індукція в ярмі ротора (Тесла)	0.596661
Магнітна індукція в повітряному зазорі (Тесла)	1.05072
Магнітна індукція в магніті (Тесла)	1.14284
Коефіцієнт шунтування (відгалуження) зубців статора	0.0207698
Коефіцієнт шунтування ярма статора	7.532016-06 (або 7.532016e-06)
Коефіцієнт шунтування ярма ротора	7.24663e-06
Ампер-витки зубців статора (А.В)	1619.7
Ампер-витки ярма статора (А.В)	2.45094
Ампер-витки ярма ротора (А.В)	1.67441
Ампер-витки повітряного зазору (А.В)	898.812
Ампер-витки магніту (А.В)	-2522.68
Коефіцієнт магнітного розсіювання	1
Коефіцієнт корекції довжини магнітного кола ярма статора	0.857678
Коефіцієнт корекції довжини магнітного кола ярма ротора	0.850665
Діюче значення (RMS) основної гармоніки лінійної ЕРС виходу (В)	226.983
Коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) індукованої напруги (%)	0.278308
Момент зачеплення / когінг-момент (Н·м)	6.03238
ДАНІ ПОВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	
Діюче значення (RMS) лінійного струму (А)	28.1343
Діюче значення (RMS) фазного струму (А)	28.1343
Діюче значення (RMS) фазної напруги (В)	132.787
Теплове навантаження якоря (A^2/mm^3)	11.1986

Продовження таблиці А.1

Питоме електричне навантаження (А/мм)	10.7463
Густина струму якоря (А/мм ²)	1.04209
Втрати на тертя та вентиляцію (Вт)	16.3
Втрати в сталі (осерді) (Вт)	464.972
Втрати в міді якоря (Вт)	81.5896
Загальні втрати (Вт)	562.862
Вихідна потужність (Вт)	10007.7
Вхідна потужність (Вт)	10570.6
ККД (%)	94.6752
Повна потужність (ВА)	11207.4
Коефіцієнт потужності	0.892961
Синхронна швидкість обертання (об/хв)	163
Номінальний обертальний момент (Н·м)	619.275
Кут навантаження / потужності (градуси)	2.56078
Максимальна вихідна потужність (Вт)	200879
Струм короткого замикання (А)	599.876
СХЕМА ОБМОТКИ	
Опис схеми обмотки	3-фазна двошарова обмотка може бути розміщена в 15 пазах наступним чином: AAZBXCCYAZBBXCY
Електричний кут на один паз (елек. градуси)	48
Вісь фази А (елек. градуси)	96
Центр першого пазу (елек. градуси)	0
ВХІДНІ ДАНІ ДЛЯ TRANSIENT FEA (MCE)	
Для обмотки якоря: Кількість витків	135
Паралельні гілки	1
Опір на виводах (Ом)	0.0343597
Індуктивність лобового розсіювання (Гн)	6.6077e-05
Еквівалентні значення 2D:	
Розрахункова глибина моделі (мм)	100
Еквівалентний коефіцієнт заповнення статора	0.96
Еквівалентний коефіцієнт заповнення ротора	0.96
Еквівалентна залишкова індукція Br (Тесла)	1.23
Еквівалентна коерцитивна сила Hc (кА/м)	890

ГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М. БЕКЕТОВА**

*Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури*

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Розробка вітрогенераторної установки потужністю 10 кВт для автономного живлення домогосподарства

**Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ 2022-1
П.С. Ільїнський**

Керівник: доц. О.Б. Єгоров

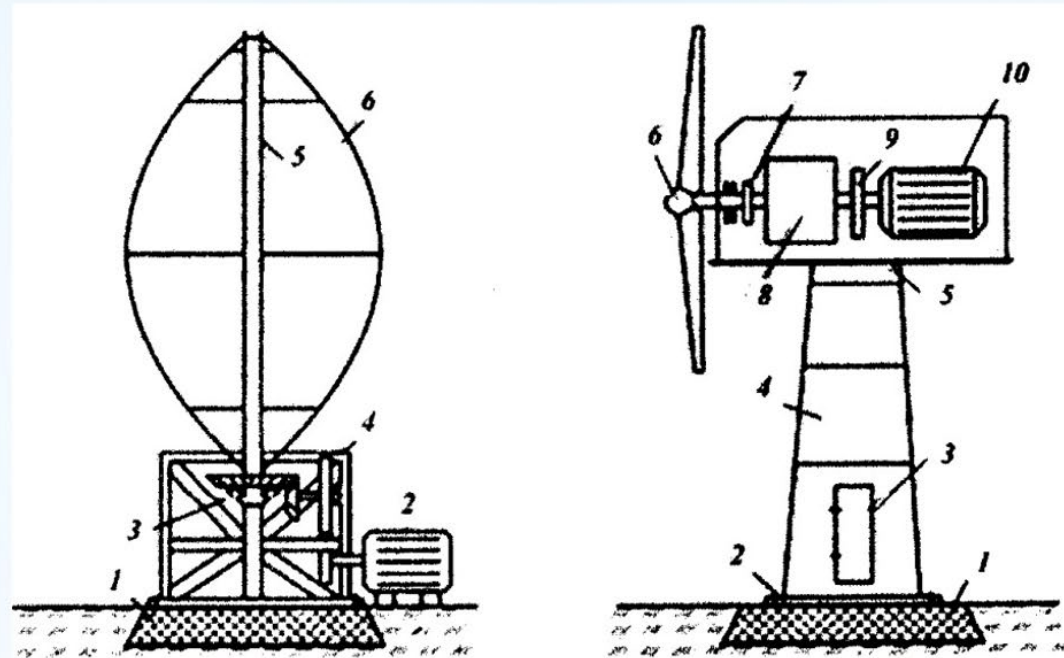
Цілі та завдання проєктування

Мета. Розробка автономної вітроенергетичної установки потужністю 10 кВт для забезпечення живлення критичного навантаження котеджу в с. Фонтанка Одеської області незалежно від стану зовнішньої мережі.

Завдання:

1. Аналіз конструкцій вітрогенераторів, вибір типу установки, оцінка вітроенергетичного потенціалу, аеродинамічний розрахунок ВЕУ, вибір додаткового обладнання, математичне моделювання ВЕУ.
2. Розробка заходів з охорони праці при обслуговуванні електроустановок до 1000 В.

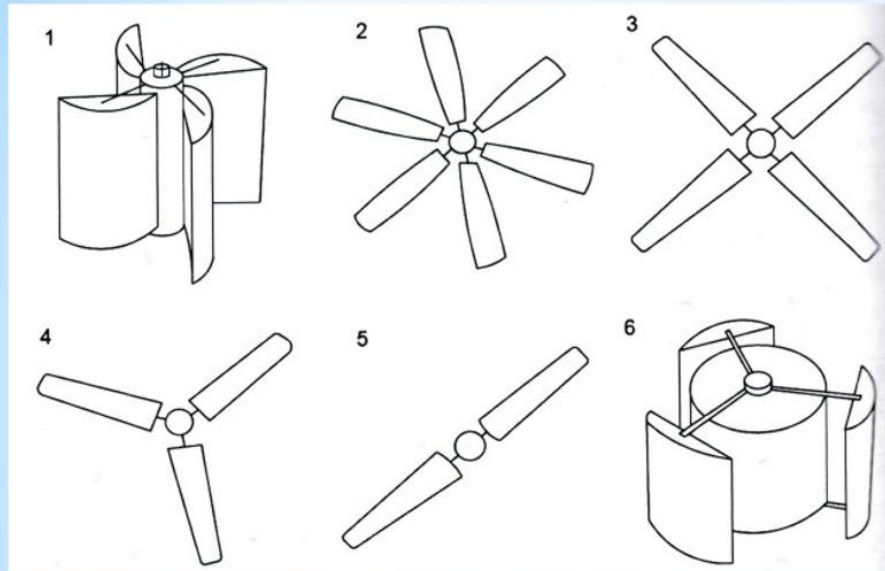
**Зовнішній вигляд вітроустановки з вертикальною віссю
(а) та з горизонтальною віссю обертання (б)**



Вертикально-осьові ВЕУ: 1 - фундамент, 2 - генератор, 3 - опорний підшипник, 4 - редуктор, 5 - головний вал, 6 - лопаті ротора.

Горизонтально-осьові ВЕУ: 1 - фундамент, 2 - опорне кільце, 3 - вхід у башту, 4 - башта з трьома секціями, 5 - поворотне кільце з приводом, 6 - лопатевий ротор, 7 - муфта, 8 - редуктор, 9 - гальмівний диск, 10 - генератор

Класифікація вітродвигунів за орієнтацією осі обертання

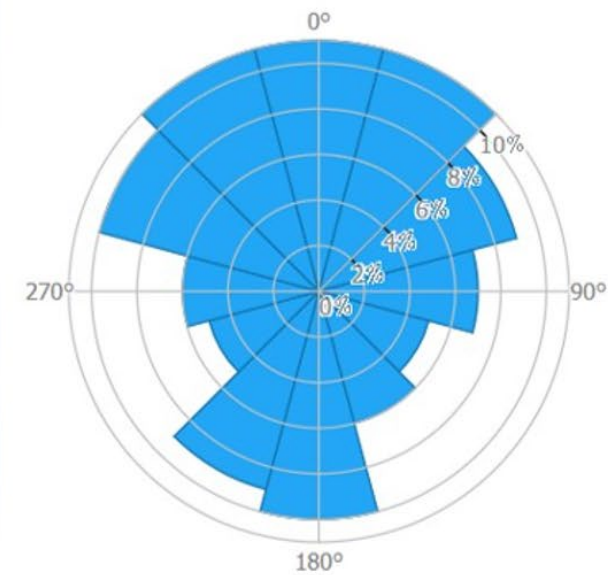
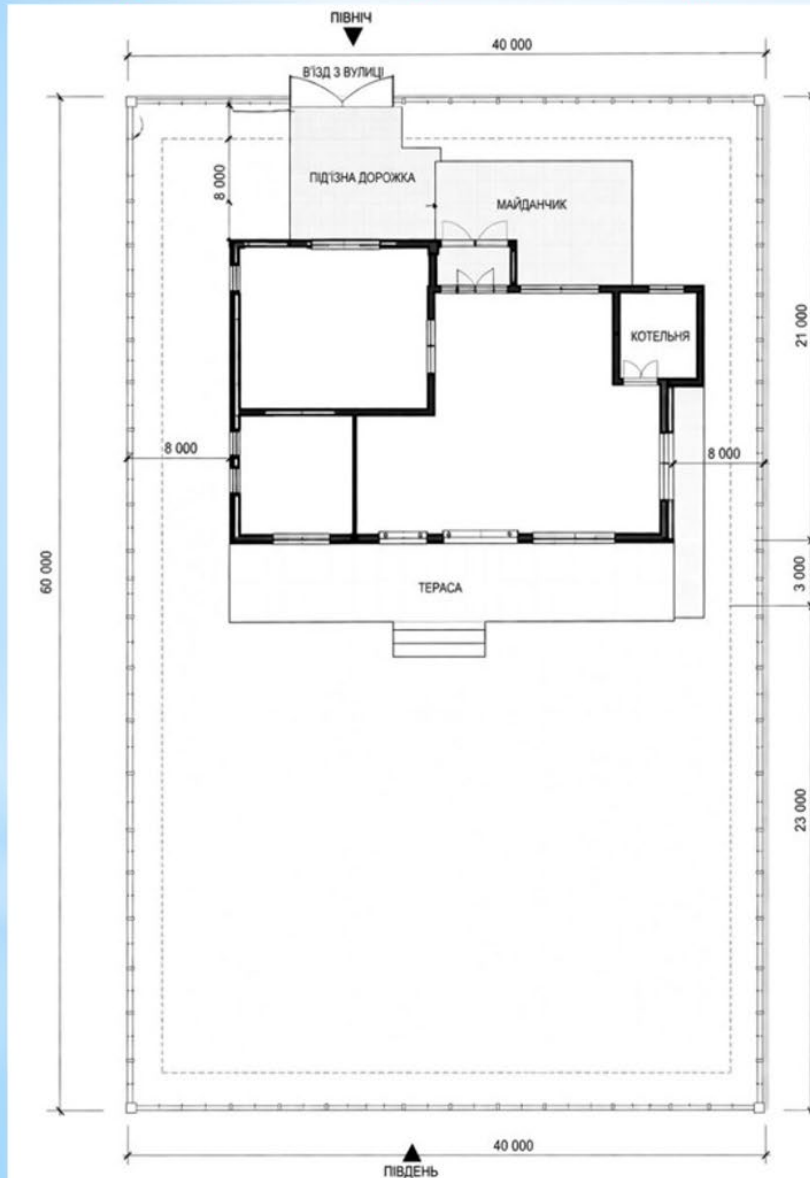


1,6 – вертикально-осьові (карусельні:
1 – лопатеві, 6 – ортогональні);
2-5 – горизонтально-осьові
(крильчасті: 2 – багатолопатеві,
3 – чотирилопатеві,
4 – трилопатеві,
5 – дволопатеві)

**Різновиди вертикально-осьових вітроколів: 1 – чашковий;
2 – ротор Савоніуса; 3 – ротор Дар'є**



Генеральний план ділянки з котеджем



Роза вітрів

Критична група навантаження (Контур А)

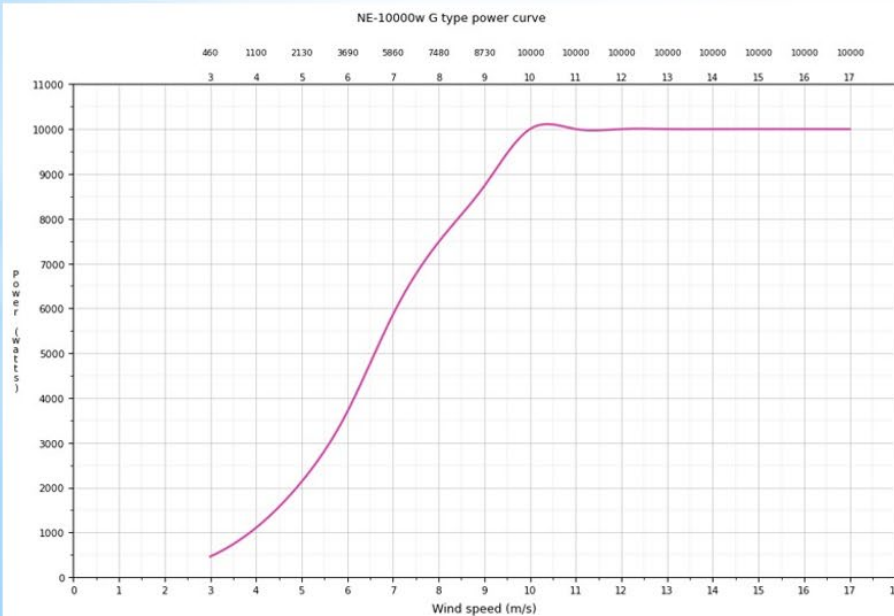
Споживач	Зима, кВт·год	Літо, кВт·год
Тепловий насос	28,0	9,0
Свердловинний насос	2,2	2,2
Вентиляція	8,4	8,4
Система фільтрації	2,4	2,4
Холодильник	3,8	3,8
Інтернет GPON	1,2	1,2
LED освітлення	3,0	3,0
Разом	47,9	28,9

Живлення цієї групи здійснюватиме проєктована вітроенергетична установка. Значення у 47,9 кВт·год і потужності у 9,37 кВт є орієнтиром для вибору відповідних компонентів ВЕУ, зокрема для вибору інвертора та розрахунку ємності акумуляторних батарей.

Характеристики вітрогенератора NE-10kG 10kW

Параметр	NE-10kG 10 kW
1	2
Номінальна потужність (кВт)	10
Максимальна потужність (кВт)	13
Діаметр ротора (м)	8,2
Кількість лопатей	3
Матеріал лопатей	Армоване скловолокно
Тип генератора	ПМСГ (NdFeB) трифазний
Номінальна напруга (В)	220/240/380
Стартова швидкість вітру (м/с)	3
Номінальна швидкість вітру (м/с)	10
Максимальна швидкість вітру (м/с)	до 45

Крива потужності NE-10kG 10kW



Вітрогенератор NE-10kG 10kW

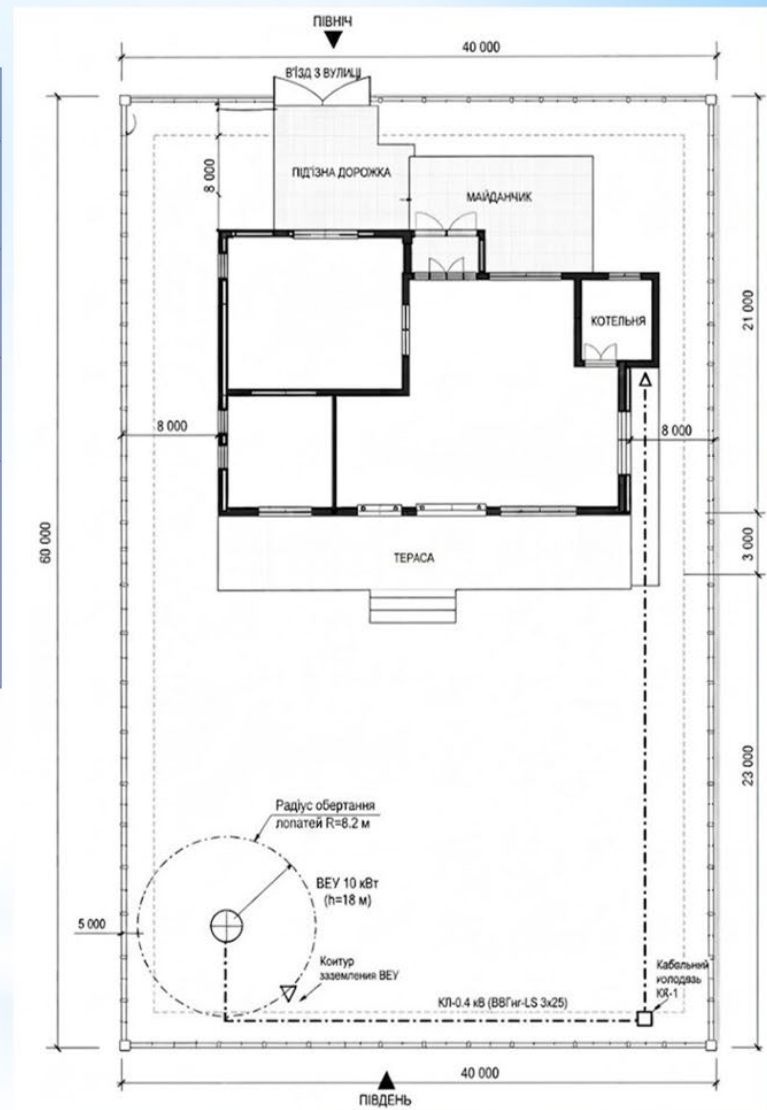
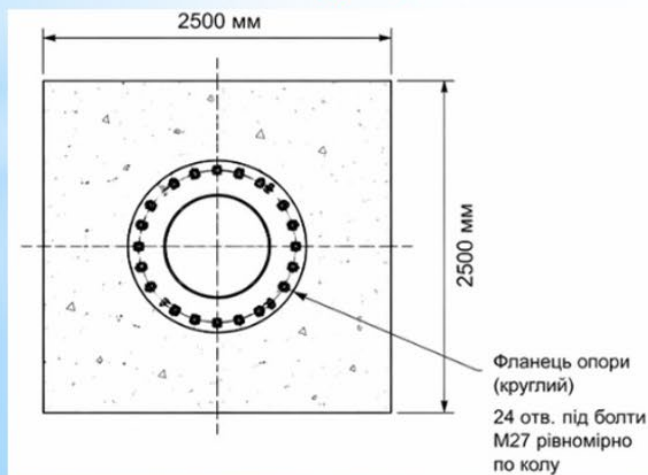


NACA 4412

Обладнання автономної ВЕУ

Тип обладнання	Модель	Ключові параметри
Гібридний інвертор	LuxPower LXP LB-12K	12 кВт, 48 В, 250 А струм заряду/розряду
Контролер заряду	FKJ-B PWM 500v + dump load 12 кВт	48 В / 300 А, MPPT захист та гальмування
Акумуляторний банк	MUST LP21-48300 (5 шт.)	1500 А·год (загальна ємність 76,8 кВт·год)
Опора (Щогла)	Сталева вільностояча	Висота 18 метрів, секційна, кріплення 24 болти М27, фундамент 2500×2500×1500 мм

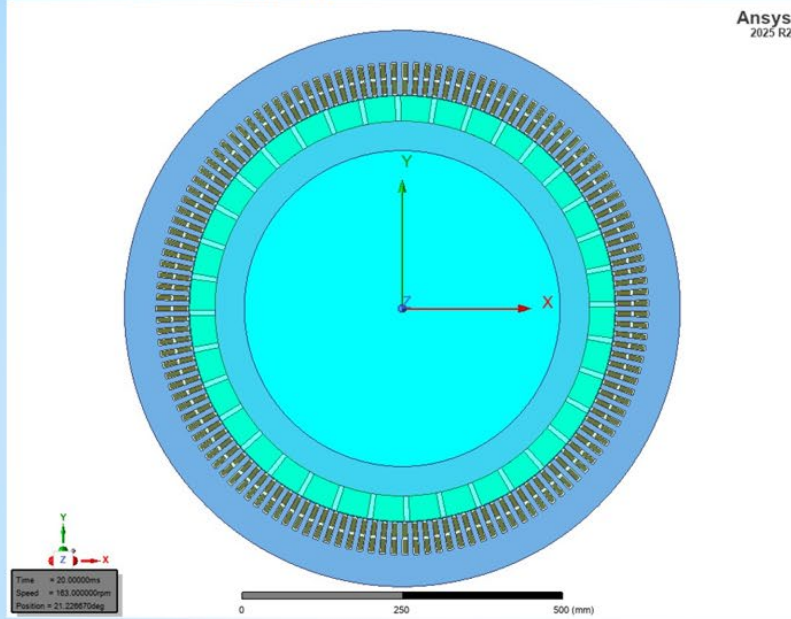
План кріплення опори ВЕУ до фундаменту



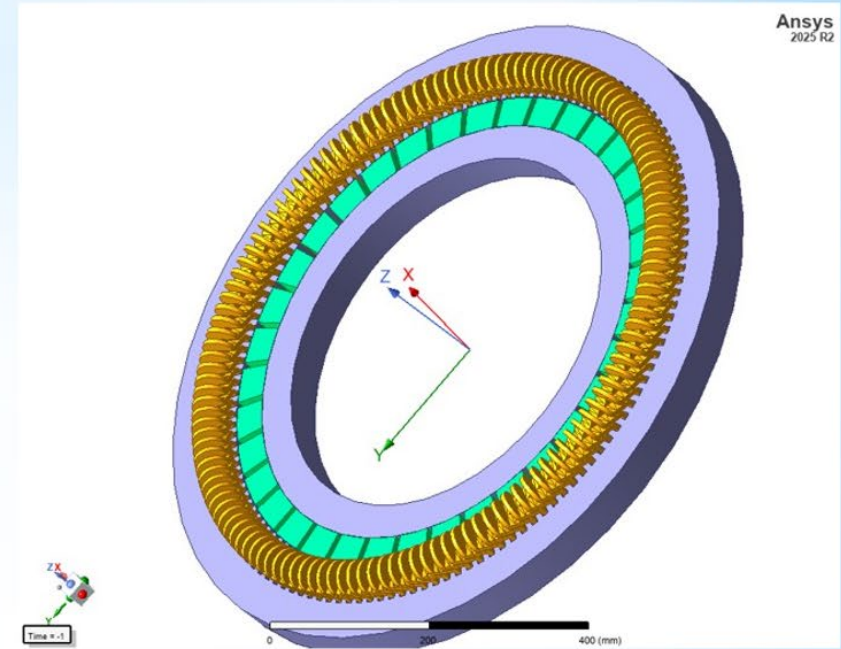
План ділянки з розміщенням ВЕУ, кабельною трасою та контуром заземлення

Результати моделювання

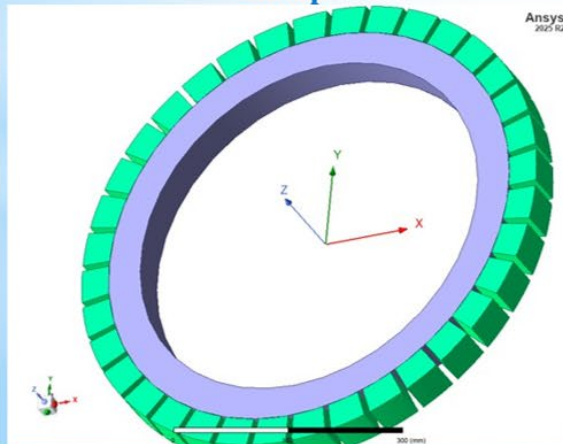
2D модель генератора



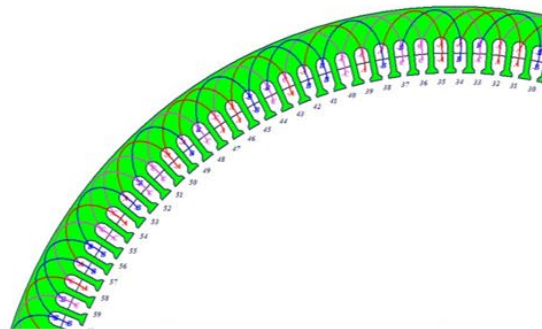
3D модель генератора



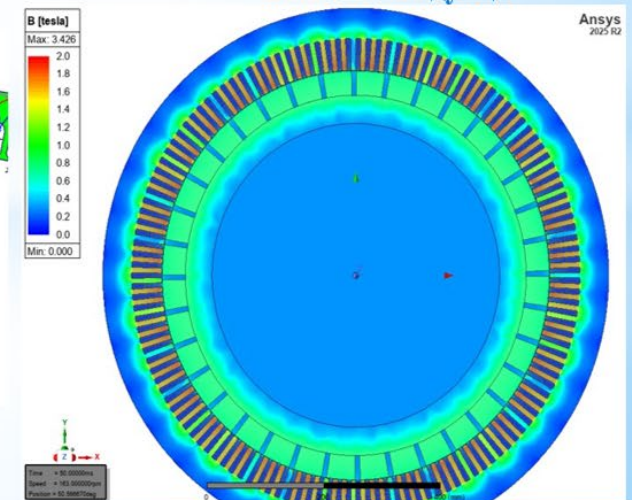
Ротор



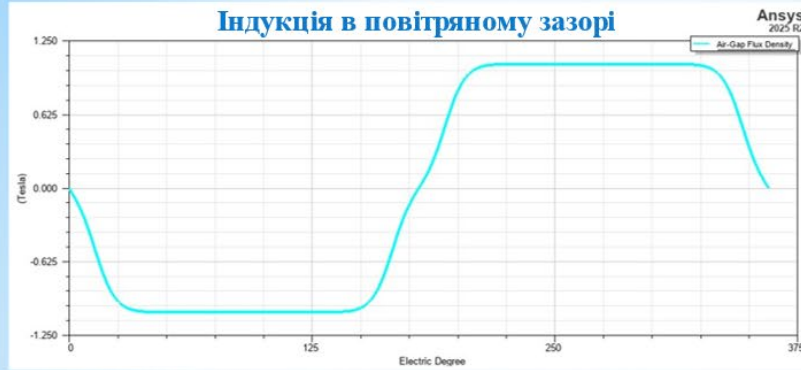
Обмотка статора



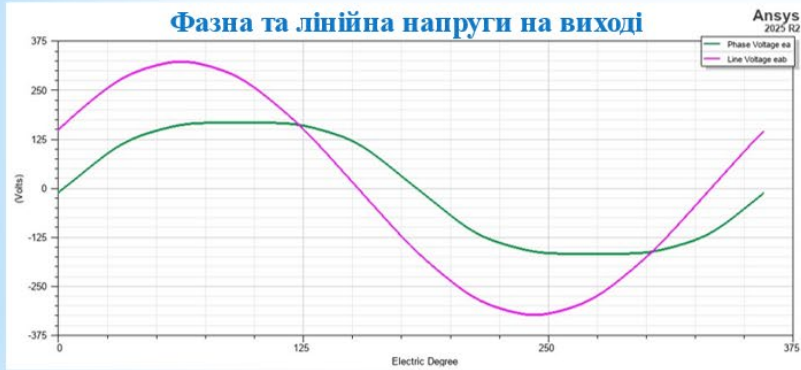
Магнітна індукція



Індукція в повітряному зазорі



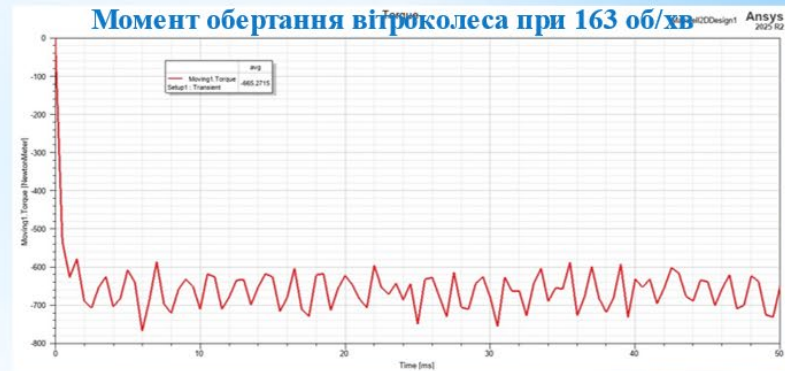
Фазна та лінійна напруги на виході



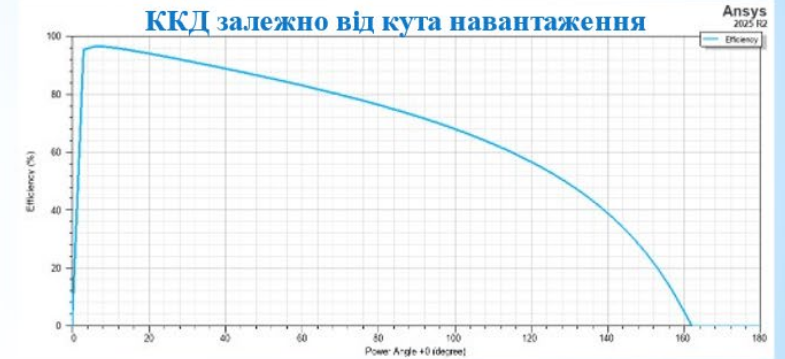
Струми у фазах



Момент обертання вітроколеса при 163 об/хв



ККД залежно від кута навантаження



Технічний параметр	Значення
1	2
Середньоквадратичне значення лінійного струму (A)	28.1343
Середньоквадратичне значення фазного струму (A)	28.1343
Середньоквадратичне значення фазної напруги (В)	132.787
Теплове навантаження якоря (A^2/mm^3)	11.1986
Питоме електричне навантаження (A/mm^2)	10.7463
Густина струму якоря (A/mm^2)	1.04209
Втрати на тертя та вітророзподіл (Вт)	16.3
Втрати на залізоному осерді (Вт)	464.972
Втрати на міді якоря (Вт)	81.5896
Загальні втрати (Вт)	562.862
Вихідна потужність (Вт)	10007.7
Вхідна потужність (Вт)	10570.6
ККД (%)	94.6752
Видима потужність (ВА)	11207.4
Коефіцієнт потужності	0.892961
Синхронна швидкість (об/хв)	163
Номінальний крутний момент (Н·м)	619.275
Кут потужності (градус)	2.56078

Висновки по роботі

Оцінено вітроенергетичний потенціал майданчика.

Виконано порівняльний аналіз вітрогенераторів та обрано модель з антикорозійним покриттям для морського клімату.

Проведений аеродинамічний розрахунок підтвердив відповідність параметрів ротора поставленому завданню.

Підібрано комплекс додаткового обладнання, що забезпечує автономну роботу необхідного обладнання без генерації протягом більше доби.

Математичне моделювання генератора підтвердило коректність прийнятих проєктних рішень та високий ККД машини.

У розділі охорони праці розглянуто специфічні небезпеки системи, визначено порядок безпечного обслуговування електроустановок, розраховано контур захисного заземлення та підібрано засоби захисту для всіх ділянок системи.