

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

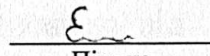
**Розробка побутового енергогенеруючого
пристрою**

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

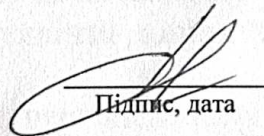
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу групи ЕТс-22-2


Підпис

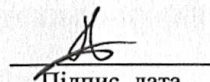
Єгоров В.О.
Ініціали, прізвище

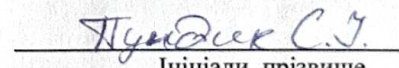
Керівник


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата


Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище


2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2. 06 2025

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Єгоров Віталій Олегович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка побутового енергогенеруючого пристрою**
керівник роботи **Поліщук О.С., д.т.н., професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики вітрогенераторів-аналогів**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 **Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи**

2 **Розробка побутового енергогенеруючого пристрою**

3 **Розрахунок основних параметрів побутового енергогенеруючого пристрою**

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. **Вітрогенератори. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2.**

Енергогенеруючий пристрій. Складальне креслення (A1). Аркуш 3.

Енергогенеруючий пристрій. Деталювання (A1). Аркуш 4.

Енергогенеруючий пристрій. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 5.

Енергогенеруючий пристрій. Схема функціональна (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	20.05.25р.	
2 Розробка побутового енергогенеруючого пристрою	01.06.25р.	
3 Розрахунок основних параметрів побутового енергогенеруючого пристрою	07.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	15.06.25р.	

Студент

Е
Підпис

В.О. Єгоров
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

[Signature]
Підпис

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Єгоров Віталій Олегович**

2. Тема бакалаврської роботи **Розробка побутового енергогенеруючого пристрою**

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 82

5. На сьогодні особливу увагу привертають вітрогенератори з вертикальною віссю обертання, які мають конструктивну простоту, не потребують систем орієнтації на вітер і здатні працювати в умовах змінного напрямку повітряного потоку. Їхня компактність та низький рівень шуму роблять такі установки придатними для інтеграції в житлову забудову. Крім того, вертикально-осьові генератори мають нижчу стартову швидкість і можуть генерувати енергію навіть при слабкому вітрі. Утім, їх впровадження обмежується рядом інженерних завдань, таких як підвищення коефіцієнта корисної дії, оптимізація форми лопатей та зниження вартості виготовлення. Розробка та реалізація ефективного побутового вітрогенератора, адаптованого до локальних умов, є актуальним технічним завданням. Такий пристрій має забезпечувати достатню потужність для типових побутових навантажень, мати просту у виготовленні й обслуговуванні конструкцію, а також бути енергоефективним і технологічно доцільним. Виходячи з цього тема бакалаврської роботи є актуальною. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснено розробку побутового енергогенеруючого пристрою. В третьому розділі виконано розрахунок основних параметрів побутового енергогенеруючого пристрою.

Підпис студента Є

" 2 " 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від " 19 " 06 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК 4,0/5
Рекомендації ЕК впровадити мережу в навчальний процес

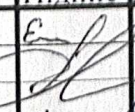


Особливі відмітки _____

Технічний секретар Ю

" 19 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	8
1.1	Історія виникнення та розвитку вітроенергетики	8
1.2	Вітровий потенціал України. Перспективи розвитку української вітроенергетики	10
1.3	Загальні відомості про енергію вітру	13
1.4	Класифікація вітрових установок	15
1.5	Огляд існуючих конструкцій вертикально-осьових вітроустановок	18
1.6	Схеми роботи вітрогенераторних установок	32
1.7	Висновки до першого розділу	35
2	Розробка побутового енергогенеруючого пристрою	36
2.1	Значення та актуальність проектування побутового вітрогенератора як енергогенеруючого пристрою	36
2.2	Вихідні дані для розробки конструкції побутового вітрогенератора	38
2.3	Проектування деталей побутового вітрогенератора	39
2.4	Розробка конструкції побутового вітрогенератора	41
2.5	Розробка генератора для виробництва електричної енергії	43
2.6	Розробка моделі вертикально-осьового вітрогенератора типу Дар'є	46
2.7	Принцип роботи вітроустановки	47
2.8	Розробка функціональної схеми роботи побутового вітрогенератора	49

БРМА25.00.00.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка побутового енергогенеруючого пристрою	Літера	Арквш	Арквшів	
Виконав		Сгоров						4	82
Перевір.		Поліщук							
Н.контр. Затвер.		Гундик Неймак							
						ХНУгр.ЕТс-22-2			

ВСТУП

У сучасних умовах глобального енергетичного переходу питання ефективного та екологічно безпечного виробництва електроенергії набуває особливої актуальності. Зростаючі потреби у споживанні енергії, нестабільність світових ринків традиційних енергоносіїв, а також посилення екологічного навантаження змушують шукати нові підходи до енергозабезпечення як на національному рівні, так і в межах індивідуальних господарств. Одним із перспективних напрямів розвитку стало використання поновлюваних джерел енергії, серед яких провідне місце займає енергія вітру.

Вітрова енергія має низку переваг: вона є відновлюваною, екологічно чистою, придатною для використання у різних кліматичних зонах і дозволяє створювати автономні системи генерації [1]. Серед сучасних технічних рішень дедалі більшого значення набуває проєктування побутових вітрогенеруючих пристроїв, які можуть забезпечувати потреби приватного житла, малих господарств, фермерських ділянок або дачних об'єктів у електроенергії. Такі пристрої забезпечують автономність, енергонезалежність, гнучкість у розгортанні систем енергозабезпечення та зменшення навантаження на централізовані мережі.

Особливу увагу при цьому привертають вітрогенератори з вертикальною віссю обертання (ВВО), які мають конструктивну простоту, не потребують систем орієнтації на вітер і здатні працювати в умовах змінного напрямку повітряного потоку. Їхня компактність та низький рівень шуму роблять такі установки придатними для інтеграції в житлову забудову. Крім того, вертикально-осьові генератори мають нижчу стартову швидкість і можуть генерувати енергію навіть при слабкому вітрі. Утім, їх впровадження обмежується рядом інженерних завдань, таких як підвищення коефіцієнта корисної дії, оптимізація форми лопатей та зниження вартості виготовлення.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зв'язку з цим, проектування та реалізація ефективного побутового вітрогенератора, адаптованого до локальних умов, є актуальним технічним завданням. Такий пристрій має забезпечувати достатню потужність для типових побутових навантажень, мати просту у виготовленні й обслуговуванні конструкцію, а також бути енергоефективним і технологічно доцільним.

Метою цієї бакалаврської роботи є розробка побутового вітрогенератора з вертикальною віссю обертання, який буде здатен стабільно генерувати електроенергію за рахунок енергії вітру при використанні доступних матеріалів та технологій. У рамках дослідження передбачено виконання аеродинамічного та конструктивного розрахунку, розробку 3D-моделі, конструкторської документації, а також техніко-економічного обґрунтування ефективності пристрою.

Таким чином, розробка побутового вітрогенеруючого пристрою - це не лише актуальне інженерне завдання, а й внесок у розвиток децентралізованих джерел енергії, підтримку енергетичної незалежності та екологічного способу життя.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Історія виникнення та розвитку вітроенергетики

Використання енергії вітру має давню історію, що охоплює тисячоліття. Перші приклади цілеспрямованого використання вітру сягають часів стародавнього Єгипту, де вже близько 3000 року до н.е. вітрила застосовувалися на човнах для навігації по Нілу. Це вважається найдавнішим відомим прикладом перетворення кінетичної енергії вітру в механічну роботу [2, 3].

У VII столітті в Персії (сучасний Іран) були розроблені перші вітряні млини з вертикальною віссю обертання, призначені для помолу зерна та підйому води. Вони мали просту конструкцію з вертикальним ротором і вітрилоподібними лопатями. Пізніше, в XII столітті, у Європі почали масово використовувати млини з горизонтальною віссю обертання, конструкція яких з часом значно вдосконалювалася. Найбільшого поширення вони набули в Нідерландах, де використовувалися для осушення болотистих земель.

З початком індустріалізації вітроенергетика тимчасово втратила актуальність, оскільки була витіснена ефективнішими паровими турбінами та двигунами внутрішнього згоряння. Проте вже наприкінці XIX століття з'явилися перші спроби перетворення енергії вітру в електричну. У 1887 році шотландський інженер Джеймс Блайт створив перший вітровий генератор для живлення свого будинку, а в 1891 році данський фізик Пауль ла Кур розробив вітротурбіну з динамо-машиною, яка дозволяла заряджати акумулятори [2, 3].

У середині XX століття з розвитком електротехніки, а згодом - на тлі енергетичних криз 1970-х років, інтерес до вітроенергетики зріс. Державні програми в Європі, США, Японії підтримували розвиток відновлюваних джерел енергії, що сприяло появі першого покоління промислових вітрогене-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

раторів. У цей період були розроблені принципи оптимального розрахунку лопатей, аеродинамічного навантаження та регулювання потужності [2, 3].

Починаючи з 1990-х років, вітроенергетика перейшла в нову фазу розвитку. Значне зниження вартості технологій, розвиток матеріалознавства, підвищення ефективності генераторів та підтримка з боку держав і міжнародних організацій сприяли стрімкому нарощуванню встановлених потужностей. До кінця 2010 року світова потужність перевищила 190 ГВт, а до 2023 року - вже понад 900 ГВт, що свідчить про стабільне зростання галузі (рис.1.1).

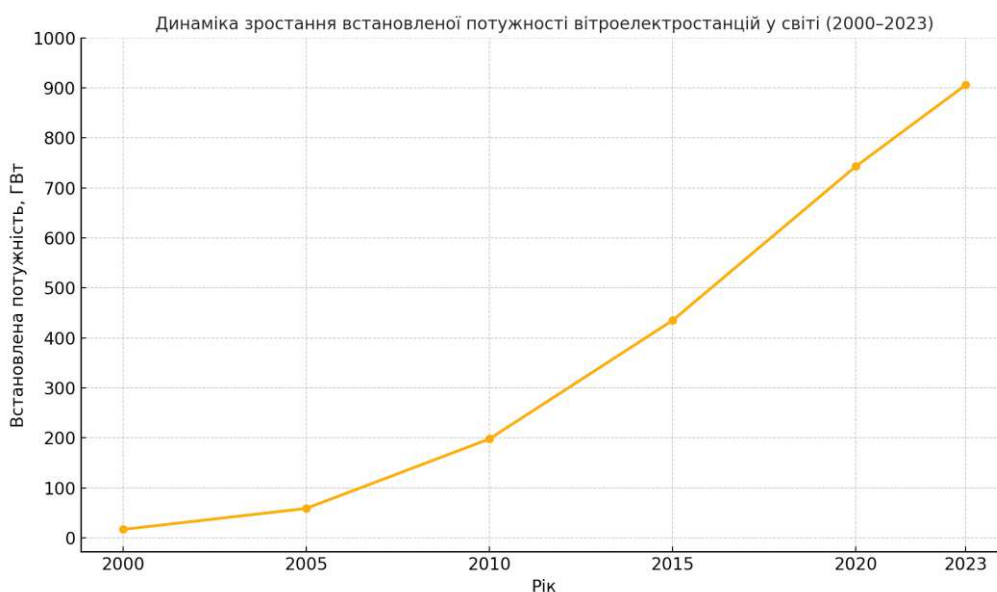


Рисунок 1.1 – Динаміка зростання встановленої потужності вітроелектростанцій у світі (2000–2023)

Зростання потужностей вітроелектростанцій супроводжується масштабуванням їх конструкцій. Сучасні офшорні установки досягають одиничної потужності 10–15 МВт, мають ротор діаметром понад 200 метрів і оснащуються системами активного керування кутом атаки. Окрім великих електростанцій, активно розвивається напрямок малогабаритних і побутових вітрогенераторів, особливо з вертикальною віссю обертання (ВВО), які мають перс-

пективу використання в умовах низьких швидкостей вітру та в локальних автономних системах енергозабезпечення.

Попри стрімкий розвиток галузі, питання ефективності ВВО залишається відкритим. У зв'язку з цим зростає потреба в експериментальних дослідженнях, спрямованих на вивчення їх аеродинамічних характеристик, впливу конструктивних параметрів, а також на пошук оптимальних рішень щодо генерації енергії. Саме ці аспекти лежать в основі тематики даної бакалаврської роботи, метою якої є розробка універсальної лабораторної установки для дослідження вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання.

1.2 Вітровий потенціал України. Перспективи розвитку української вітроенергетики

Україна має сприятливі передумови для розвитку вітроенергетики завдяки географічному положенню, значній площі території, різноманітному рельєфу та доступу до берегових зон Чорного й Азовського морів [5, 6]. Ці фактори формують значний вітровий потенціал, який може бути ефективно використаний як для централізованого, так і для автономного електропостачання.

За оцінками науково-дослідних установ і державних органів, загальний теоретичний потенціал вітроенергетики України перевищує 250 млрд кВт·год на рік. Проте з урахуванням економічних, технологічних і територіальних обмежень, технічний потенціал оцінюється у 16–24 ГВт встановленої потужності, з яких 5–8 ГВт можуть бути реалізовані найближчим часом за наявності сприятливих інвестиційних та регуляторних умов.

Регіональний розподіл вітрового ресурсу свідчить про найбільшу перспективність південних та східних областей, таких як:

- Херсонська область (до 7,5 м/с),
- Одеська та Миколаївська області (7,0–7,2 м/с),

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

- Запорізька область (понад 7,0 м/с),
- Луганська та Донецька області (6,8–6,9 м/с).

Для зручності оцінки просторового розподілу потенціалу на рисунку 1.2 представлено умовну середньорічну швидкість вітру на висоті 100 м по адміністративних регіонах України [5, 6].

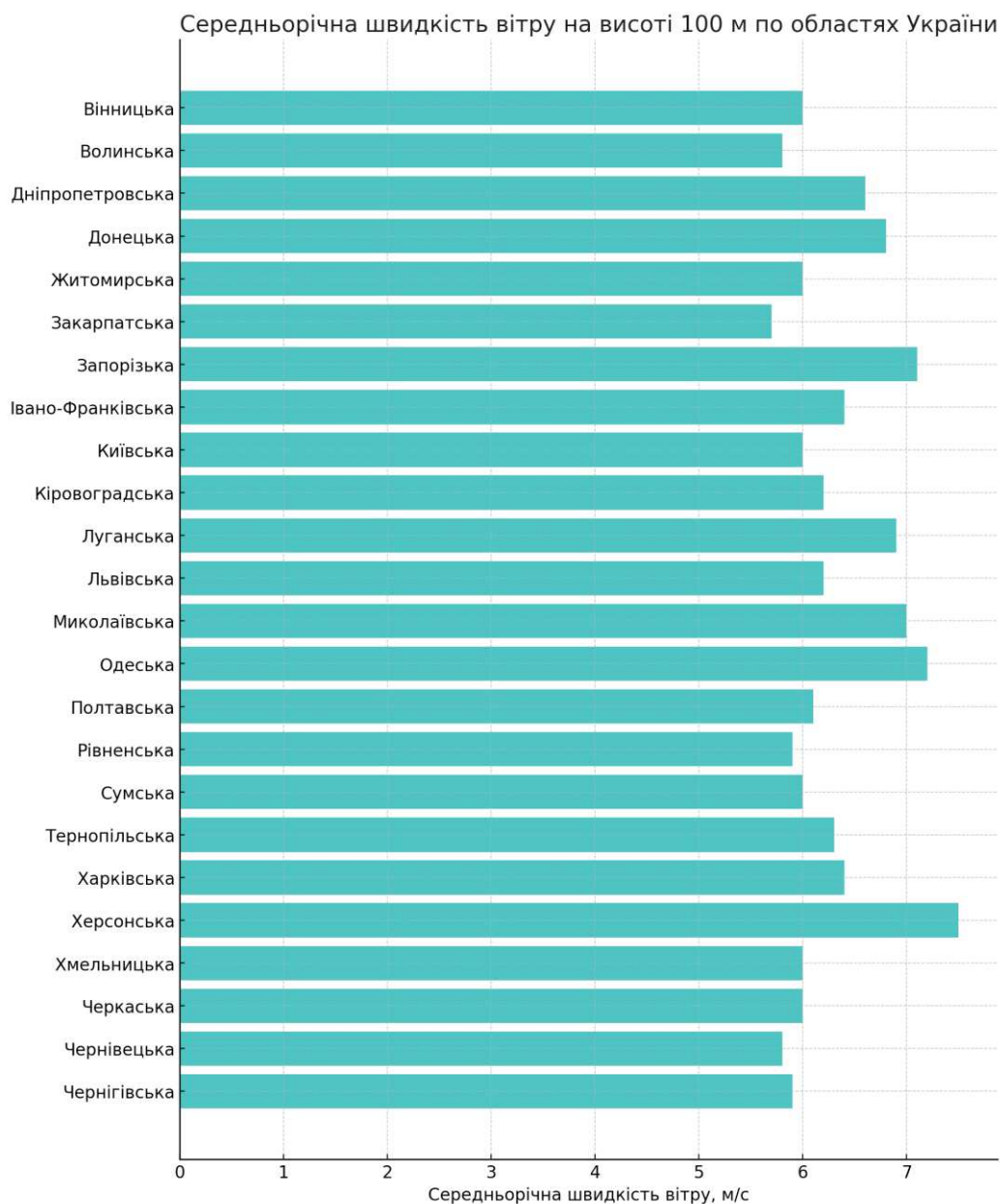


Рисунок 1.2 – Середньорічна швидкість вітру на висоті 100 м по регіонах України

Реалізація потенціалу вітрової енергетики в Україні розпочалася наприкінці 1990-х років з будівництва перших вітрових електростанцій у Криму (наприклад, Донузлавська та Тарханкутська ВЕС). У 2010-х роках розвиток значно пришвидшився завдяки впровадженню зеленого тарифу, що забезпечив гарантований дохід інвесторам у відновлювану енергетику. Станом на кінець 2021 року загальна встановлена потужність ВЕС в Україні перевищила 1,7 ГВт, а кількість реалізованих об'єктів сягнула понад 20 великих вітроелектростанцій [5].

Втім, із початком повномасштабного вторгнення РФ у 2022 році реалізація проєктів у прифронтових регіонах зазнала суттєвих втрат: деякі ВЕС зруйновані, інші - законсервовані або частково демонтовані. Незважаючи на це, у західних та центральних областях (Львівська, Тернопільська, Івано-Франківська, Київська) продовжується підготовка нових проєктів, зокрема у форматі локальних мікрогридів (microgrids) і спільних громадських ініціатив.

У стратегічній перспективі українська вітроенергетика орієнтується на кілька ключових напрямів:

- післявоєнне відновлення великих ВЕС на основі оновлених європейських стандартів, з використанням турбін класу 5–10 МВт;
- розвиток офшорної вітроенергетики у шельфовій зоні Чорного моря, де потенціал перевищує 10 ГВт;
- масове впровадження малих вітроенергетичних установок, орієнтованих на індивідуальних споживачів, фермерські господарства, об'єкти критичної інфраструктури;
- використання вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання (ВВО) в умовах нестабільного або турбулентного вітрового потоку (наприклад, у міському середовищі, гірських долинах або на технічних дахах будівель).

Особливої актуальності набуває розробка лабораторних дослідницьких установок для ВВО, які дозволяють моделювати роботу таких пристроїв, до-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сліджувати їхню ефективність, а також тестувати конструктивні зміни. Саме на це спрямовано поточну бакалаврську роботу, яка має на меті створення універсального експериментального стенду для вивчення параметрів вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання.

Таким чином, вітроенергетика України має не лише значний ресурсний потенціал, але й стратегічне значення для підвищення енергетичної незалежності, стійкості до криз і розвитку «зеленої» економіки в поствоєнний період.

1.3 Загальні відомості про енергію вітру

Енергія вітру - це кінетична енергія повітряних мас, що переміщуються внаслідок різниці атмосферного тиску, яка, у свою чергу, виникає через нерівномірне нагрівання поверхні Землі сонячною радіацією [7]. Цей механізм робить вітер однією з найбільш доступних і поновлюваних форм енергії, що не залежить від палива й не створює шкідливих викидів. Потенціал використання вітру в енергетичних цілях постійно зростає завдяки вдосконаленню турбін, генераторів і систем керування.

Фізичною основою для виробництва енергії є кінетична енергія рухомого повітря, яку можна розрахувати за формулою:

$$P=1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (1.1)$$

де P - потужність вітрового потоку, Вт;

ρ - густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$ (стандартно: $1,225 \text{ кг}/\text{м}^3$);

A - площа поперечного перерізу ротора вітрогенератора, м^2 ;

v - швидкість вітру, $\text{м}/\text{с}$.

Оскільки потужність прямо пропорційна кубу швидкості вітру, навіть незначне її збільшення суттєво підвищує енергетичну віддачу установки. Наприклад:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- при $v=4\text{м/с}$ - потужність становить $\approx 39\text{ Вт/м}^2$;
- при $v=8\text{м/с}$ - вже $\approx 314\text{ Вт/м}^2$;
- при $v=12\text{м/с}$ - понад 827 Вт/м^2 .

Ця залежність чітко ілюструється на рисунку 1.3, де показано зростання потужності вітрового потоку в залежності від швидкості вітру [8]:

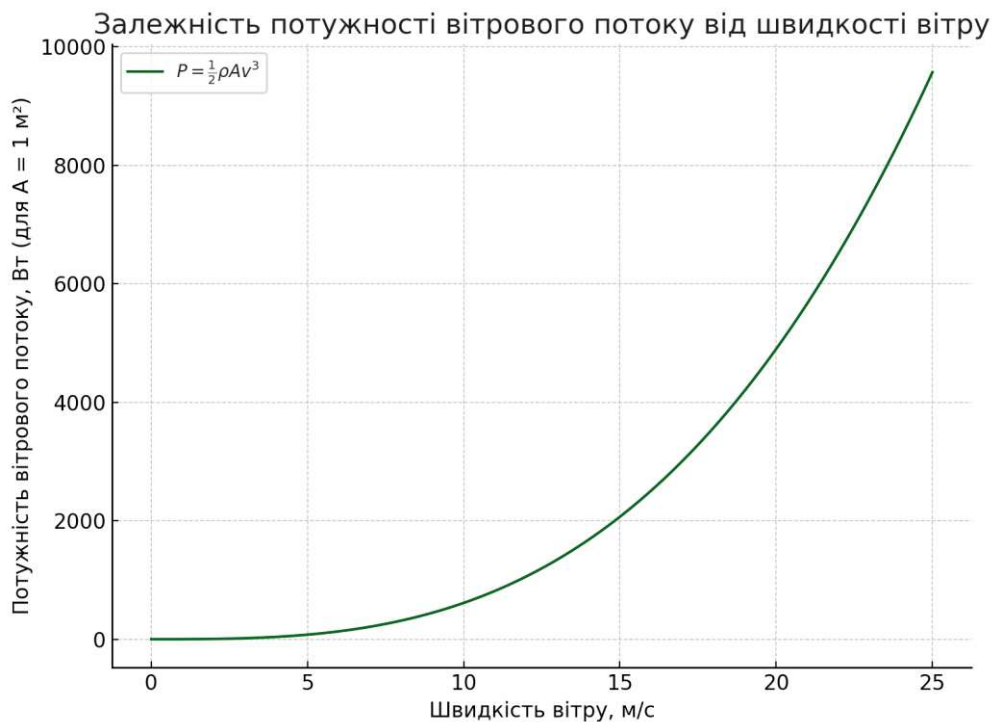


Рисунок 1.3 – Залежність потужності вітрового потоку від швидкості вітру
($A = 1\text{ м}^2$)

Максимально можлива ефективність перетворення енергії вітру у механічну визначається законом Беца, згідно з яким жодна вітрова турбіна не може перетворити більше ніж 59,3 % кінетичної енергії повітряного потоку.

У реальних умовах сучасні вітрогенератори досягають коефіцієнта корисної дії на рівні 35–45 %, залежно від типу конструкції, швидкості вітру, системи навантаження та висоти ротора. На ефективність також впливають:

- густина повітря (знижується з висотою та зростанням температури);
- висота ротора (вища висота - вищі швидкості та стабільність);
- турбулентність потоку (впливає на навантаження та ресурс вузлів);

- геометрія лопатей і їхній кут атаки;
- тип електричного навантаження (постійне чи змінне).

У випадку вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання ефективність перетворення зазвичай нижча, ніж у горизонтальних систем, проте ВВО мають важливі переваги: вони не потребують механізмів орієнтації за вітром, можуть працювати за складних вітрових умов і добре підходять для встановлення на обмежених майданчиках, дахах будівель, міських об'єктах та у зонах із нестійким вітром.

Точне визначення енергетичних характеристик ВВО потребує експериментального підтвердження, оскільки їхня поведінка в реальних умовах є складною для математичного моделювання. У зв'язку з цим розробка лабораторної установки для дослідження енергії вітру та параметрів вертикальних вітрогенераторів є важливим етапом у підготовці майбутніх фахівців і розвитку ефективних енергетичних рішень.

1.4 Класифікація вітрових установок

Вітрові установки, або вітроелектричні установки (ВЕУ), - це інженерні системи, що перетворюють кінетичну енергію вітру на електричну або механічну енергію. Залежно від призначення, конструкції, розмірів, принципу дії та умов застосування вітрові установки класифікуються за низкою ознак. Основні критерії класифікації наведено нижче [10].

1. За функціональним призначенням.

Електрогенеруючі установки - перетворюють енергію вітру в електричну. Є найпоширенішими і використовуються як у промисловому, так і в побутовому секторі.

Механічні вітроустановки - безпосередньо використовують механічну енергію (наприклад, для перекачування води, помолу зерна).

2. За орієнтацією осі обертання ротора.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Горизонтальні (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines):

- ротор розташований паралельно до напрямку вітру;
- потребують системи орієнтації;
- висока ефективність при стабільному напрямку вітру.

Вертикальні (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines):

- ротор розташований перпендикулярно до напрямку вітру;
- не потребують механізмів орієнтації;
- краще підходять для міських умов і зон зі змінним вітром.

3. За кількістю лопатей:

- однолопатеві - легші, але потребують балансування;
- двохлопатеві - компроміс між масою та стабільністю;
- трилопатеві - найпоширеніші в промислових ВЕУ завдяки оптимальній ефективності та стійкості;
 - багатолопатеві - частіше застосовуються в механічних установках (наприклад, водяних насосах).

4. За потужністю:

- мікроустановки (до 1 кВт) - для живлення малих автономних систем, сигналізацій, освітлення;
- малі (1–10 кВт) - для приватних будинків, ферм;
- середні (10–100 кВт) - для локальних енергосистем, невеликих підприємств;
- промислові (великі) (понад 100 кВт до декількох МВт) - встановлюються на вітропарках і електростанціях;
- офшорні установки - морські системи потужністю 5–15 МВт і більше.

5. За принципом перетворення енергії:

- з прямим приводом - ротор напряму з'єднаний з генератором (менше втрат, простіше обслуговування);
- з редуктором - між ротором і генератором встановлено передавальний механізм (підвищує оберти для генератора змінного струму).

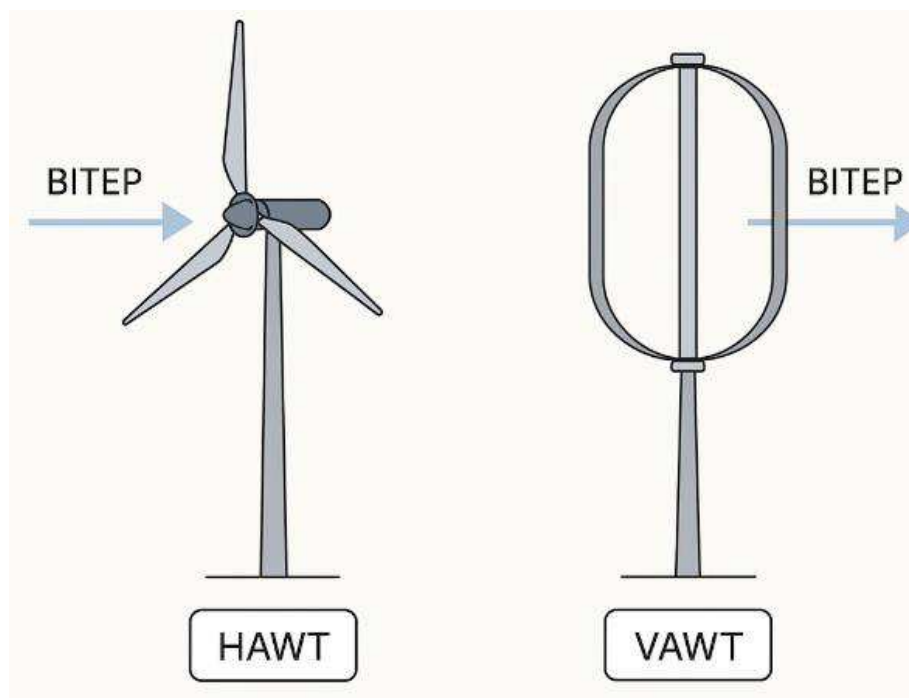
					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

6. За способом встановлення:

- наземні - на щоглах або вежах (найпоширеніші);
- дахові - встановлюються на будівлях (актуальні для ВВО);
- плавучі (офшорні) - закріплюються на платформах у морі або океані.

7. За способом підключення:

- автономні (ізольовані) - працюють незалежно від електромережі, час-то з акумуляторами;
- мережеві - інтегруються в централізовану енергомережу через інвертор.
- гібридні системи - поєднують ВЕУ з іншими джерелами (сонячні панелі, дизель-генератори).



а

б

а - з горизонтальною (HAWT); б - вертикальною (VAWT) віссю

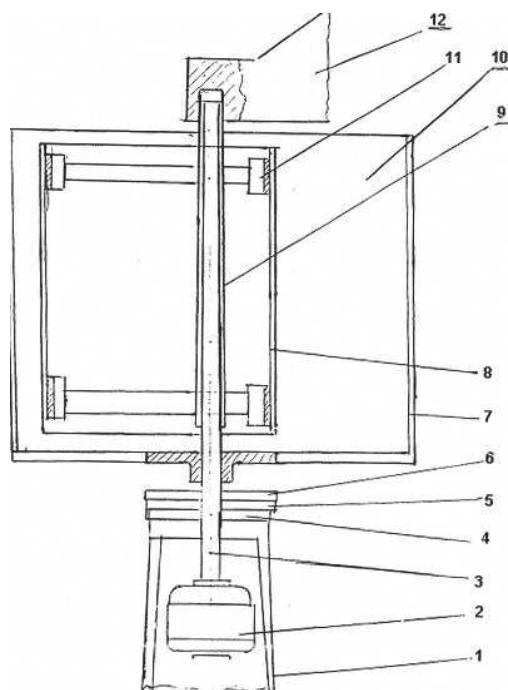
Рисунок 1.4 демонструє основні типи вітрових установок за орієнтацією вісі обертання:

Правильний вибір типу вітрової установки залежить від конкретних умов експлуатації: доступного вітрового ресурсу, просторових обмежень,

режиму навантаження та вимог до автономності. У контексті цієї роботи основна увага приділяється вертикальним вітрогенераторам, що є найбільш придатними для лабораторного дослідження в обмежених умовах і експлуатації при змінному вітрі.

1.5 Огляд існуючих конструкцій вертикально-осьових вітроустановок

Одним із прикладів конструктивної реалізації вертикально-осьової вітроустановки є пристрій (рис.1.5, аркуш [БРМА25.00.00.000ДО] [11]). Вітроустановка належить до типу з вертикальною віссю обертання, де енергія вітру перетворюється за допомогою гнучких парусоподібних лопатей, змонтованих на циліндричному роторі.



1 – центральна опора, 2 – генератор електричного струму, 3- вал, 4, 5 – радіальний підшипник, 6 – гальмо, 7 - великий циліндр, 8 – малий циліндр,
9 – труба, 10 – лопать, 11- ексцентрик, 12 - флюгер

Рисунок 1.5 - Схема вертикально - осьового вітряка з головним основним валом більшого циліндра:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Конструкція складається з центральної опори 1, яка виконує несучу функцію та включає засоби кріплення до основи, а також підшипникові вузли 4 і 5, які сприймають осьові й радіальні навантаження. До опори приєднано електрогенератор 2, механічно з'єднаний із вертикальним валом 3, на якому встановлюється основний ротор 7 та система гальмування 6.

Основний ротор 7 виконано у вигляді багатострижневого циліндра, до якого кріпляться гнучкі лопаті 10, виготовлені з тканини або полімерної плівки. Протилежні краї лопатей закріплюються на внутрішньому обертовому циліндрі 8, розташованому всередині ротора 7. Вісь цього внутрішнього циліндра не співпадає з віссю основного вала, а його діаметр може бути більшим або меншим за зовнішній (залежно від варіанту конструкції — див. рис. 1.5 і рис. 1.6).

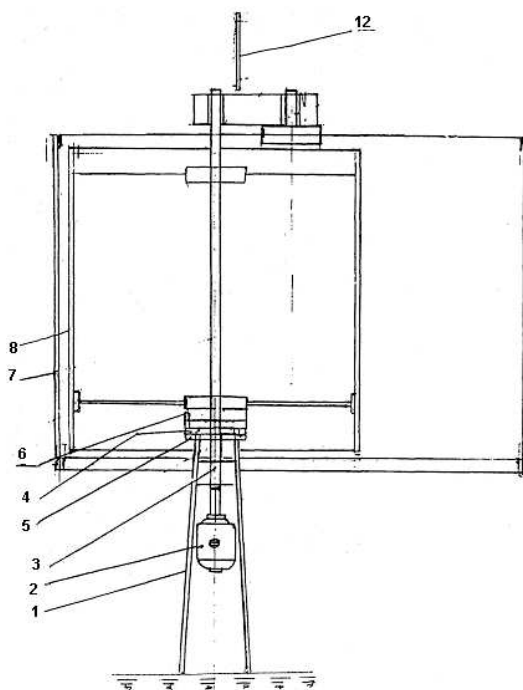


Рисунок 1.6 - Схема вертикально - осьового вітряка з головним основним валом меншого циліндра

Варіант конструкції на рис. 1.5 передбачає, що основною віссю є вісь зовнішнього більшого циліндра, жорстко з'єднаного з валом. При цьому вну-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

трішній циліндр 8 має можливість вільно обертатися всередині ротора, впливаючи на натяг і площу розгортання лопатей.

На рис. 1.6 зображено конфігурацію, в якій внутрішній циліндр 8 є основою для закріплення лопатей, а зовнішній виконує опорну та направляючу функції. В обох випадках конструкція забезпечує змінну геометрію лопатей залежно від напрямку вітру.

Поворотна труба 9, розміщена всередині конструкції, оснащена двома ексцентриками 11, на яких зафіксовані ролики для підтримки внутрішнього циліндра. Ці ексцентрики дозволяють змінювати положення циліндра 8 у просторі, забезпечуючи належне натягування парусів і регулювання кута їх атаки.

Флюгер 12, встановлений на тій самій трубі 9, забезпечує орієнтацію внутрішнього циліндра 8 відносно вітрового потоку. Завдяки такому рішенню досягається ефективно самонаведення ротора, без застосування складних електронних систем керування.

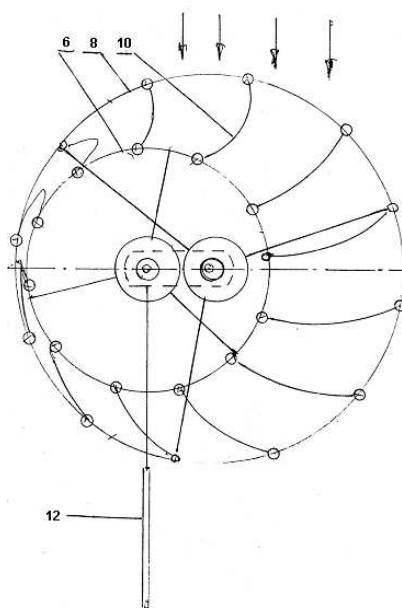
Принцип дії ґрунтується на створенні парусного ефекту: при напрямку вітру у бік лопаті, вона розгортається та створює максимальну площу опору, формуючи крутий момент. При обертанні проти напрямку вітру лопать згортається, мінімізуючи аеродинамічний опір. Циклічне чергування розгортання і згортання лопатей дозволяє забезпечити постійне обертання ротора.

Таким чином, запропонована конструкція вертикально-осьового вітряка [11] є інноваційною у використанні гнучких лопатей, системи змінної площі опору та внутрішнього механізму орієнтації. Вона поєднує компактність, конструктивну простоту та високий потенціал для автономного використання, особливо в умовах нестабільного вітру та обмеженого простору.

На рис. 1.7 представлено креслення, яке ілюструє механізм формування лопатей вітроустановки за рахунок взаємодії двох циліндричних барабанів, розміщених ексцентрично один відносно одного. Вісь меншого циліндра прийнята за центральну (основну), навколо якої обертається система. Обидва

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

барабани оснащені однаковою кількістю стержнів (позиція 12), рівномірно розташованих по колу.



6 - малий циліндр, 8 - великий циліндр, 10 – лопать 12 - флюгер

Рисунок 1.7 - Схема утворення лопатей:

Конструктивно передбачається, що обидва циліндри обертаються з однаковими кутовими швидкостями, забезпечуючи синхронізовану зміну просторового положення стержнів і натягнутих між ними гнучких елементів (лопатей). На найближчі пари стержнів двох циліндрів натягується парусна тканина або полімерна плівка, яка жорстко закріплюється вздовж усієї довжини стержнів.

Ширина кожної лопаті визначається як різниця радіусів циліндрів.

У зоні, де стержні циліндрів максимально віддалені один від одного (права половина конструкції на рис. 1.7), лопаті повністю розтягнуті, створюючи ефективну робочу поверхню для взаємодії з повітряним потоком. У цій зоні тиск вітру викликає появу корисного крутного моменту. Натомість у протилежній - лівій половині, де стержні зближуються, лопаті складені або ослаблені, що мінімізує аеродинамічний опір при русі проти вітру.

На рис. 1.5 зображено варіант, де вісь меншого циліндра є головною. Більший циліндр монтується на опорі з поворотним колесом і приводним ва-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

лом, який з'єднано з флюгером 12, встановленим на головному вертикальному валу 3. Завдяки цьому досягається синхронізація обертання зовнішнього циліндра з напрямом вітру.

На рис. 1.7 схематично представлено принцип формування робочої лопаті: тканинна лопать натягнута між двома найближчими стержнями різних циліндрів. Унаслідок обертання барабанів у однаковому напрямку з однаковими швидкостями відбувається циклічне формування, натяг і послаблення лопатей у процесі обертання.

У робочій зоні - на ділянці найбільшого віддалення стержнів - лопаті перебувають у максимально розгорнутому стані, перпендикулярно до потоку вітру, сприймаючи його тиск і формуючи обертовий момент. У процесі обертання, зі зміною кута положення стержнів, парусні елементи поступово втрачають натяг, а їхні внутрішні кінці переміщуються швидше зовнішніх, змінюючи кут атаки. При виході зі щілин між стержнями лопаті знову натягуються і повертаються до положення з максимальною площею, орієнтованою до вітру.

Принциповою особливістю цієї конструкції є жорсткий кінематичний зв'язок обох циліндрів, що забезпечує їх постійне узгоджене обертання. Таке рішення дозволяє уникнути динамічної нестабільності при змінному вітровому навантаженні. У деяких конструктивних варіантах передбачається часткове перекриття площин обертання циліндрів, що сприяє зменшенню зустрічного опору та підвищенню енергоефективності.

Флюгер 12, змонтований на валу 3 меншого циліндра (d), виконує функцію автоматичного керування напрямом ротора. Через систему важелів та зв'язків він зміщує положення осі більшого барабана (D), що, у свою чергу, активує оптимальне формування лопатей у зоні дії вітру. Такий механізм дозволяє вітроколесу ефективно працювати за будь-якого напрямку вітру без потреби у зовнішньому керуванні чи додаткових датчиках.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Основні переваги описаної вертикально-осьової вітроустановки полягають у простоті конструкції, мінімальній кількості механічних вузлів, низькій вартості виготовлення лопатей, можливості роботи в міських умовах і адаптації до змінного вітрового потоку.

Лопаті 10 - виготовляються з недорогих гнучких матеріалів (парусина, плівка). Циліндри 7, 8 - формуються зі звичайних труб або прутків. Головний вал 3 - розташовується вертикально, що дозволяє знизити центр ваги установки та використовувати компактну опору (нижчу, ніж у НAWT).

Завдяки зазначеним властивостям, описана схема може бути масштабована до рівня потужних автономних вітрогенераторів, а також адаптована для спеціалізованих застосувань - зокрема як база для побудови анемометричних пристроїв із функцією обертового вимірювання швидкості вітру.

На рис. 1.8 зображено конструкцію вертикально-осьової вітрової електроустановки (ВЕУ) 1 для освітлення автомобільних доріг [12]. Вона включає роторний вітровий двигун 2 типу Савоніуса з вигнутими лопатями 3, що передають обертання на вертикальний вал 4, з'єднаний з електромеханічним генератором 5.

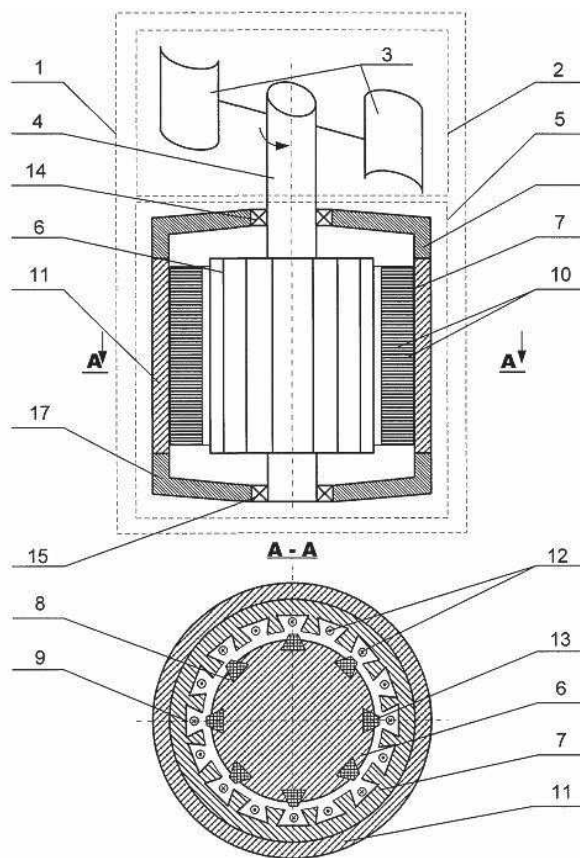
Генератор виконано у вигляді рухомого 6 і нерухомого 7 магнітопроводів, розташованих коаксіально з радіальним зазором. В обох магнітопроводах передбачені поздовжні пази 8 і 9, орієнтовані вздовж спільної осі. Нерухомий магнітопровід 7, набраний із листів 10 електротехнічної сталі, вміщений у металевий корпус 11, а в його пазах розташована якорна обмотка 12.

У пазах рухомого магнітопроводу 6 встановлено постійні магніти 13 з чергуванням полярності. Магнітопровід 6 обертається всередині статора 7 на підшипниках 14 і 15, змонтованих у щитах 16 і 17, і приводиться в рух від вала 4.

Електричне навантаження складається з акумулятора 21 та енергозберігаючих ламп 22, які підключаються до обмотки 12 через керовані комутаційні пристрої 18–20. Вітрові установки 1 можуть розміщуватись уздовж авто-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

магістралей між смугами зустрічного руху 23 і 24, а для підвищення надійності живлення об'єднуються в мережу за допомогою провідників 25.



1 – вітрогенератор, 2 – вітродвигун, 3 - лопоть, 4 - вал, 5 - генератор, 6, 7 - магнітопровід, 8, 9 - паз, 10 - лист електротехнічної сталі, 11 - корпус, 12 - якорна обмотка, 13 - постійний магніт, 14, 15 - підшипник, 16, 17 - підшипниковий щиток

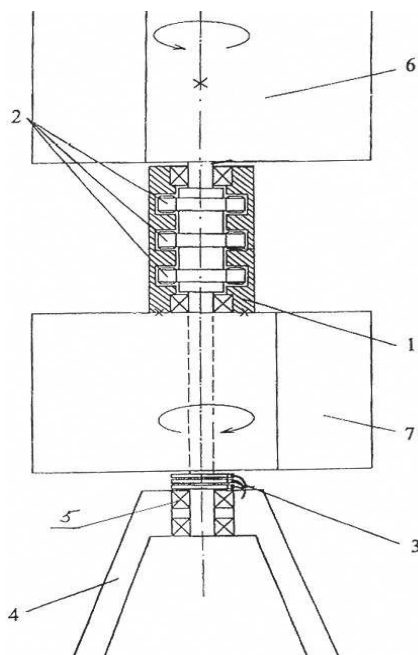
Рисунок 1.4 – Схема вертикально - осьової вітрової установки для освітлення доріг:

Принцип дії полягає у перетворенні енергії повітряного потоку (природного або створеного рухом транспорту) у обертове магнітне поле, яке, взаємодіючи з якорною обмоткою, індукує електрорушійну силу, що живить світильники.

Переваги: автономність та адаптація до дорожніх умов; можливість роботи навіть за слабкого вітру (від транспортного потоку); модульність - об'єднання кількох ВЕУ в єдину систему; надійність і простота обслуговування.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

На рис. 1.9 представлено конструкцію вітрового генератора, яка відрізняється використанням двох співвісних турбін 6 і 7, розташованих ортогонально одна до одної, тобто з осями, перпендикулярними до напрямку повітряного потоку. Така конфігурація забезпечує підвищену ефективність перетворення енергії вітру за рахунок зустрічного обертання елементів генератора, описаного у джерелі [13].



1 - статор, 2 - ротор, 3 – струмознімач, 4 - опора, 5 - підшипник,
6, 7 - турбіна

Рисунок 1.5 – Вітрогенератор із двома співвісними турбінами:

Статор 1 розміщується на спільному валу між двома парами підшипників - однією спільною з ротором, іншою - із загальною опорою 4. Ротор 2, відповідно, підтримується на другій парі підшипників, що закріплені в несучій конструкції 5. На обох кінцях вала ротора 2 змонтовано дві турбіни 6 та 7, одна з яких має обертові лопаті, повернуті у протилежний бік відносно другої.

У центральній частині ротора розміщено струмознімач 3, який передає згенеровану електроенергію від обмоток до зовнішнього навантаження. За-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вдяки оригінальній кінематичній схемі обидві турбіни діють у протилежних напрямках, одна з них передає момент на ротор, а інша - на статор.

Принцип дії генератора полягає у використанні рівних за розміром, але протилежно орієнтованих турбін, які при взаємодії з повітряним потоком створюють обертальний момент у різних напрямках. Турбіна 6, з'єднана з валом ротора 2, обертається, наприклад, за годинниковою стрілкою, тоді як турбіна 7, жорстко з'єднана з корпусом статора 1, обертається у протилежному напрямку. Таким чином, створюється відносне обертання між ротором і статором, яке еквівалентне подвоєній швидкості обертання, у порівнянні з класичними генераторами, де обертається лише ротор, а статор залишається нерухомим.

Це технічне рішення дозволяє збільшити вихідну потужність генератора без необхідності підвищення швидкості вітру чи розміру турбін. Оскільки генерована потужність прямо пропорційна відносній швидкості обертання, відбувається практично дворазове підвищення енергетичного виходу порівняно з традиційними вітрогенераторами.

У порівнянні з прототипами, де осі турбін розташовані паралельно до напрямку вітру, запропонована ортогональна схема має низку переваг. У класичних послідовних турбін одна з них завжди працює в умовах турбулентного, сповільненого потоку, що йде після першої турбіни. У результаті друга турбіна отримує повітря з нижчою швидкістю і меншою густиною потоку, а ефективність її роботи суттєво знижується.

Крім того, при однакових габаритах лопатей і нерівних умовах обдування, перша турбіна формує вищу потужність, що створює додаткове навантаження на другу. Це може призвести до ситуації, коли електромагнітний момент, який генерується більш потужною турбіною, примусово обертає другу турбіну у своєму напрямку. У такому разі відносна швидкість між ротором і статором дорівнює нулю, і як наслідок - генератор не виробляє енергії.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

У наведеній конструкції (рис. 1.9) такий ефект виключається завдяки тому, що турбіни працюють у незалежних вітрових потоках, розміщені під різними кутами до вітру і не впливають одна на одну аеродинамічно. Це забезпечує стабільну віддачу потужності, незалежно від локальних збурень у повітряному потоці, та дозволяє ефективно використовувати турбіни однако-вих розмірів.

Одним із найпоширеніших типів вертикально-осьових вітрових турбін є ротор Дар'є (рис. 1.10), конструкція якого базується на використанні підйомної сили, що виникає при обтіканні повітряним потоком двох або трьох вигнутих лопатей, виконаних у формі тонких еліптичних або симетричних профілів [14]. Ці лопаті жорстко закріплені на вертикальному валу і мають аеродинамічну форму, що забезпечує ефективне створення обертового мо-менту.

Підйомна сила, яка генерується на лопатях ротора, є максимальною у фазі, коли лопать рухається з великою швидкістю перпендикулярно до напрямку вітру. У цей момент виникає найбільша різниця тисків на внутрішній і зовнішній поверхнях профілю, що забезпечує появу крутного моменту, зда-тного обертати вал установки.

Оскільки у конструкції ротора Дар'є не використовується сила опору, він не здатен самостійно запускатись із стану спокою. Тому у практиці засто-сування таких установок часто передбачають додатковий запусковий меха-нізм - наприклад, електричний привід, який короткочасно працює в режимі двигуна, або допоміжну турбіну типу Савоніуса, інтегровану в ротор або змонтовану співвісно.

Турбіна Савоніуса, яка часто використовується як стартер для ротора Дар'є, діє за принципом опору повітряному потоку. Її лопаті виготовляються з вигнутих металевих листів прямокутної форми й утворюють напівцилінд-ричні або S-подібні канали. Потік вітру, що потрапляє на таку поверхню, створює різноспрямований тиск на зовнішні й внутрішні сторони лопатей, у

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Другий ярус повітрозбірника з'єднаний з чотирма повітропроводами, які подають повітря до задньої частини лопатей (вікна 9 і 10). Це дозволяє уникнути нульового моменту на затінених ділянках обертання, підвищуючи ефективність ротора у 1,5–2 рази.

Другий ступінь турбіни представлений редуктором або варіатором 11 і крильчаткою-маховиком 12, що стабілізує оберти та компенсує вплив поривчастих вітрів.

Третій ступінь містить крильчатку 13, яка формує зворотний потік 14, що додатково стабілізує обертання ротора і може підвищити загальну потужність установки до 2,5 разів.

Повітряний потік спрямовується через повітрозбірники 2, 3 і жалюзі 8 на жорсткі 4 і м'які 6 паруси, а вікно 5 створює локальний максимум тиску на критичній точці паруса. Крильчатки 7 спрямовують потік уздовж осі ротора.

Завдяки комплексній системі подачі потоку і стабілізації обертання, установка має високий ККД, підвищену надійність та можливість масштабування.

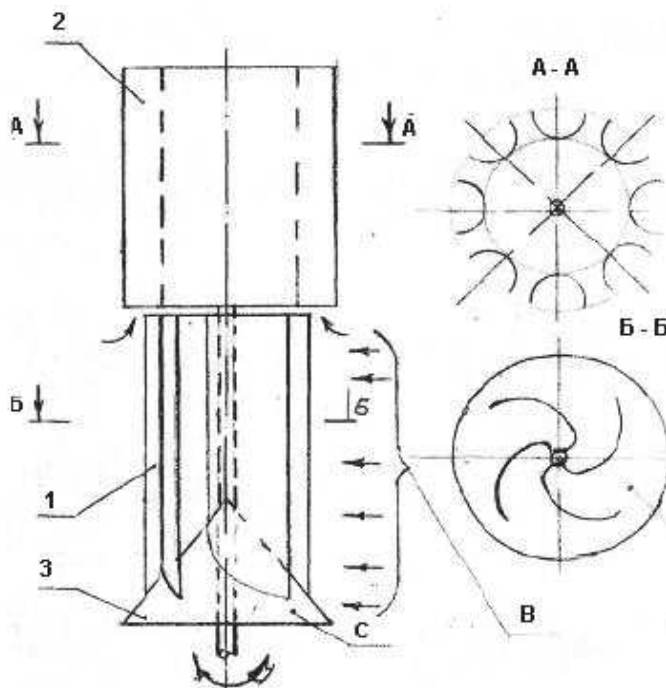
На рис. 1.12 представлено вдосконалену конструкцію вертикально-осьового ротора типу Савоніуса, у якій реалізовано новий підхід до формування робочих лопатей та організації відпрацьованого потоку [16].

Робочі лопаті виконано у вигляді вертикальних поверхонь, твірна яких проходить паралельно осі ротора, починаючись біля неї і формуючи при проєкції на горизонтальну площину розгорнуту евольвенту (еволюта - коло). Така геометрія дозволяє збільшити вітрильну площу у порівнянні з напівциліндричними формами, що підвищує коефіцієнт використання енергії вітру.

Кількість лопатей може бути дві і більше, а вал ротора жорстко з'єднаний з електрогенератором. Особливістю конструкції є випукла вгору конічна поверхня, яку описує нижній край лопаті при обертанні, та розміщений над ротором дефлектор, вісь якого співпадає з віссю ротора. Конус спря-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

мовує потік знизу вгору, а дефлектор створює зону розрідження, покращуючи вентиляцію та тягу у робочій зоні.



1- ротор типу Савоніуса, 2-дефлектор, 3- конус із самоскидною поверхнею, С - поверхня ротора самоскидна, В - робоча поверхня повітря

Рисунок 1.12 - Ротор типу Савоніуса:

Відпрацьований повітряний потік, після взаємодії з лопатями, направляється вздовж вертикальної осі ротора угору, де потрапляє у зону дії дефлектора. Така аеродинамічна схема сприяє посиленню ефективності роторної установки, зменшенню опору та стабілізації обертання. Додатково, конічна поверхня розташована під кутом до вертикалі, що дозволяє здійснювати самоочищення від снігу, води та пилу.

У моделі проведено порівняльні дослідження, які підтвердили, що за однакових умов подачі повітря потужність скомпанованого агрегата з дефлектором і конусом вища, ніж у аналогічної установки без цих елементів. Це забезпечує підвищення енергоефективності без ускладнення механіки обертання.

										Арк.
										31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА25.00.00.000 ПЗ					

1.6 Схеми роботи вітрогенераторних установок

Сучасні вітроенергетичні системи можуть працювати за різними схемами залежно від умов експлуатації, типу споживача та енергетичних цілей. Найпоширенішими є автономна схема з акумуляторами, гібридна схема з резервуванням від мережі, а також мережева схема без акумуляторів, що використовується для генерації енергії з подачею в загальну енергосистему [17].

Автономна схема з акумуляторними батареями (Off-Grid).

Один із базових варіантів реалізації вітроустановки подано на рис. 1.13. У цій схемі вітер обертає лопаті вітрогенератора, які через вал приводять у рух ротор. Обертання ротора в полі магнітів викликає появу електрорушійної сили (ЕРС) на затискачах статора. Отриманий змінний струм надходить до контролера, де випрямляється, стабілізується та використовується для заряджання акумуляторних батарей.

Для живлення побутових пристроїв або інших споживачів електроенергії з акумуляторів подається на інвертор, який перетворює її у змінний струм промислової частоти (50 Гц) та стандартної напруги (220 В).

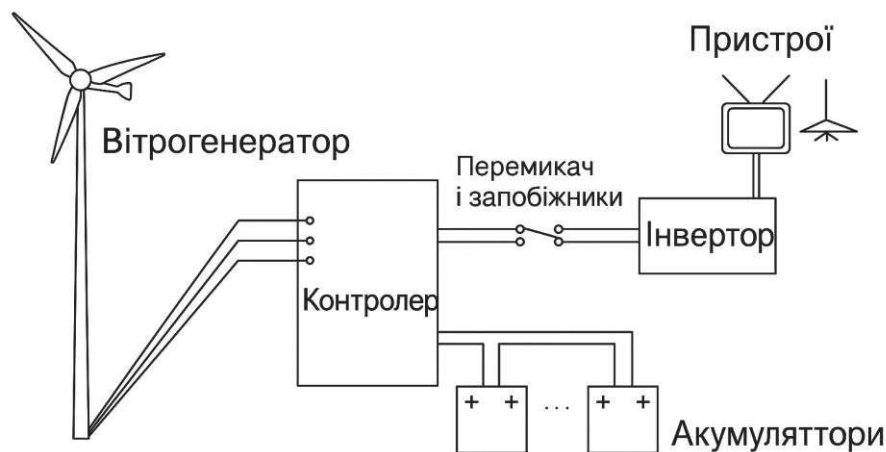


Рисунок 1.13 - Принципова схема роботи вітрогенератора (OffGrid)

Гібридна схема з мережею та акумуляторами (Off-Grid + Grid Backup)

На рис. 1.14 зображено варіант підключення, за якого вітрогенератор працює з двома джерелами живлення - автономною системою (через акумуля-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

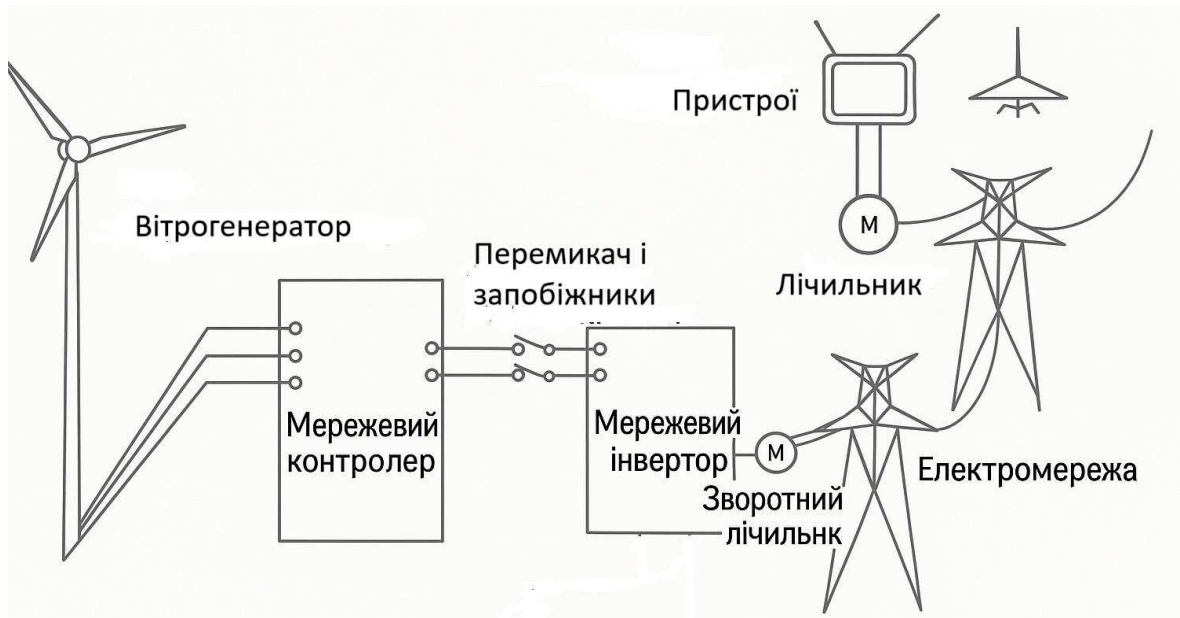


Рисунок 1.15 - Робота вітрогенератора без акумулятора на мережу (OnGrid)

Технічні аспекти та елементи схем.

Основним функціональним елементом кожної із зазначених схем є контролер. Він забезпечує: стабілізацію напруги; захист акумуляторів від глибокого розряду або перезарядки; керування інвертором; моніторинг стану системи в режимі реального часу.

Інвертори, особливо у мережевих і гібридних рішеннях, є найскладнішими та найдорожчими компонентами. У більшості сучасних систем використовують каскадні багаторівневі інвертори, які здатні поєднувати декілька джерел постійного струму з низькою напругою (наприклад, батареї по 12–48 В) та формувати високоякісну вихідну синусоїдальну напругу.

Слід також зазначити, що акумуляторні батареї є найменш довговічними компонентами системи. Вони мають обмежений цикл заряд–розряд, і навіть сучасні LiFePO₄ або гелеві АКБ не гарантують безперебійної роботи більше ніж 8–10 років. Крім того, накопичення електроенергії на тривалий термін залишається технічно складним завданням, що стимулює розвиток альтернатив, таких як гравітаційні акумулятори, водневі системи чи електрохімічні накопичувачі нового покоління.

										Арк.
										34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА25.00.00.000 ПЗ					

1.7 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено огляд розвитку вітроенергетики з акцентом на вертикально-осьові вітрові установки (ВВО), які, попри нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з горизонтальними, мають переваги в компактності, незалежності від напрямку вітру та придатності для застосування в урбанізованому середовищі.

Показано, що Україна володіє значним вітровим потенціалом, особливо в прибережних і степових зонах, що створює передумови для децентралізованого розвитку вітроенергетики навіть в умовах обмеженої енергетичної інфраструктури. Проаналізовано історичну еволюцію ВЕУ, наведено формули для розрахунку потужності вітрового потоку та побудовано графіки залежності потужності від швидкості вітру.

Виконано класифікацію вітрових установок за конструктивними, функціональними та експлуатаційними ознаками. Надано технічний аналіз конструкцій з гнучкими лопатями, багатоступеневими роторами, роторів Дар'є, Савоніуса та моделей із дефлекторами, що сприяють підвищенню ефективності.

Окрему увагу приділено трьом основним схемам енергетичного підключення ВЕУ: автономній (off-grid), гібридній (з резервом від мережі) та мережевій (on-grid). Показано роль інверторів, контролерів і акумуляторів, з урахуванням сучасних вимог до стабільності, безпеки та сумісності з системами SmartGrid.

Узагальнений аналіз підтверджує доцільність створення універсальної лабораторної установки для дослідження ВВО різних типів. Така установка дозволить експериментально оцінити їх конструктивні особливості, енергетичні параметри й поведінку в умовах змінного навантаження та напрямку вітру, що є основою подальших практичних досліджень у межах цієї роботи.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

2 РОЗРОБКА ПОБУТОВОГО ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

2.1 Значення та актуальність проектування побутового вітрогенератора як енергогенеруючого пристрою

Проектування побутового енергогенеруючого пристрою, зокрема вітрогенератора з вертикальною віссю обертання, набуває особливої актуальності в умовах сучасної енергетичної трансформації, зростання цін на енергоносії та необхідності дотримання принципів сталого розвитку [18]. У країнах з нестабільним енергетичним ринком та обмеженим доступом до централізованої електромережі, таких як Україна, впровадження автономних або напівавтономних джерел енергії є важливим кроком до посилення енергетичної незалежності домогосподарств і малих підприємств.

Побутовий вітрогенератор дозволяє ефективно використовувати локальний вітровий ресурс для покриття потреб у електроенергії, зокрема на фермерських господарствах, дачних ділянках, об'єктах поза зоною підключення до загальної електромережі. Його переваги обумовлюють низку стратегічно важливих характеристик:

Автономність енергозабезпечення. Побутовий вітрогенератор забезпечує незалежність від централізованих мереж і підвищує надійність електропостачання в умовах надзвичайних ситуацій, аварій або перебоїв у подачі струму.

Економічна ефективність. Незважаючи на початкові витрати на проектування, виробництво та встановлення, експлуатація побутового вітрогенератора передбачає мінімальні витрати на обслуговування та повну відсутність витрат на паливо. Система забезпечує швидку окупність (3–7 років) залежно від умов експлуатації.

Екологічна безпека. На відміну від генераторів на основі викопного палива, вітрогенератор не виробляє викидів CO₂, не спричиняє шумового за-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

бруднення (при правильному проектуванні) і не впливає негативно на локальні екосистеми. Це робить пристрій особливо придатним для використання в охоронних зонах або на територіях природоохоронного значення.

Технологічна гнучкість. Побутовий вітрогенератор може бути інтегрований у різні схеми енергопостачання: автономні (off-grid), гібридні (в комбінації із сонячними електростанціями та акумуляторами), або мережеві (on-grid) - з можливістю передачі надлишкової енергії до загальної електромережі.

Простота та доступність конструкції. Пристрій повинен мати спрощену, ремонтпридатну конструкцію, що забезпечує збирання та обслуговування в умовах побутових майстерень або локальних виробничих потужностей. Особливу увагу слід приділити стандартизації елементів, використанню недорогих матеріалів і можливості модульного розширення.

Освітньо-практичне значення. Проектування та виготовлення побутового вітрогенератора має високу освітню цінність: воно дозволяє студентам і фахівцям застосувати знання в галузях аеродинаміки, електромеханіки, енергетики, автоматизації, CAD/CAE-технологій. Такий пристрій буде впроваджено в навчально-лабораторних комплексах кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету для підготовки спеціалістів у сфері відновлюваної енергетики .

З позицій стратегії національного розвитку, проектування побутового вітрогенератора є елементом децентралізації енергосистеми та переходу до моделі сталого енергоспоживання. Він може стати основою створення автономних мікрогридів, що дозволяють об'єднувати невеликі джерела генерації для спільного споживання й обміну енергією в межах локальних енергетичних спільнот.

Таким чином, побутовий вітрогенератор не лише вирішує технічні задачі локального енергозабезпечення, але й стає інструментом формування енергетичної свідомості громадян, підтримки екологічного способу життя та

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

зменшення вуглецевого сліду. Його проєктування - це важливий крок до майбутнього, де чиста енергія стане доступною кожному.

2.2 Вихідні дані для розробки конструкції побутового вітрогенератора

Під час проєктування побутового вітрогенератора з вертикальною віссю обертання слід врахувати потреби автономного електрозабезпечення малих об'єктів - таких як приватні будинки, фермерські господарства, дачі тощо - без підключення до централізованої електромережі. Запланована конструкція належатиме до типу Дар'є й повинна бути доповнена стартовим ротором типу Савоніуса для забезпечення покращених пускових характеристик.

Основною аеродинамічною частиною установки повинні стати лопаті, що виготовлятимуться на базі симетричного профілю NASA з оптимізованою відносною хордою. Їх слід буде закріпити жорстко між верхньою та нижньою опорними частинами за допомогою траверс, що забезпечить просторову стабільність ротора, зменшення вібрацій та рівномірний розподіл навантажень при обертанні.

Центральним вузлом конструкції має стати ступиця, яка обертатиметься навколо вертикальної осі та передаватиме крутний момент до генераторного модуля. Для зниження тертя та підвищення довговічності обертового вузла слід застосувати високоточні підшипники, що забезпечать стабільну та плавну роботу всієї системи.

Щоб подолати неспроможність ротора Дар'є до самозапуску, в конструкції слід передбачити додатковий стартовий ротор Савоніуса, розташований над основним. Завдяки високому початковому крутному моменту, він зможе запускати систему при низькій швидкості вітру, що забезпечить надійний старт вітрогенератора за різних погодних умов.

Уся установка повинна бути змонтована на модульній щоглі, що дозволить змінювати висоту залежно від характеристик вітрового потоку на місце-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

вості. У нижній частині конструкції необхідно змонтувати безконтактний генератор з магнітними дисками та індукуючими котушками, що дозволить уникнути втрат на щітках, знизити обслуговування та підвищити надійність.

Завдяки поєднанню ефективного ротора Дар'є та стартового ротора Савоніуса, майбутній вітрогенератор має забезпечити високу продуктивність з автономністю запуску. Це зробить його перспективним рішенням для побутового енергозабезпечення та застосування в мікроелектромережах, зокрема в умовах децентралізованої енергетики.

2.3 Проектування деталей побутового вітрогенератора

На основі проведеного огляду існуючих конструкцій вітрогенераторів розроблено основні конструктивні елементи побутового вітрогенератора з вертикальною віссю обертання типу Дар'є. Усі деталі виконано відповідно до стандартів креслення, з дотриманням допусків, шорсткості та матеріалів. Розглянемо основні з них [19-23]:

1. Ступиця (аркуш [БРМА25.00.00.017]).

Центральний елемент, що з'єднує роторну систему з віссю. Має симетричну конструкцію з отворами під кріплення траверс. Передбачено посадки під підшипники, що забезпечує точне центроване обертання. Внутрішня поверхня шліфується до шорсткості Ra 6,3. Отвори виконано з допусками H14. Матеріал – сталь 45 згідно з ГОСТ 1050–88.

2. Вісь вітрогенератора (аркуш [БРМА25.00.00.005]).

Вісь призначена для передачі крутного моменту від ротора до генератора. Має кілька різьбових і гладких ділянок, фаски R1–R2, посадки під підшипники. На торцях передбачено отвори під фіксацію. Поверхні обробляються до Ra 6,3. Вісь виготовляється з вуглецевої сталі 45, що забезпечує достатню міцність.

3. Кріпильна основа (аркуш [БРМА25.00.00.013]).

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Цей елемент служить для монтажу ступиці та передачі навантаження до несучих елементів. Має отвори під болтове з'єднання та розточки під центрування. Конструкція передбачає симетричне розташування вузлів кріплення. Шорсткість поверхонь – до Ra 6,3. Деталь виготовляється з конструкційної сталі.

4. Кронштейн (аркуш [БРМА25.00.00.010])

Використовується як допоміжний монтажний елемент для кріплення обв'язки ротора або додаткових компонентів (наприклад, ротора Савоніуса). Має різьбові отвори, фаски 45°. Деталь виготовляється з конструкційної сталі Сталь 45.

5. Стакан (аркуш [БРМА25.00.00.018]).

Виконує роль втулки або вставки для з'єднання між деталями. Має циліндричну форму з внутрішніми посадками. Обробка внутрішньої поверхні до Ra 6,3, що забезпечує точне встановлення. Допуски H14, h14. Сталь – 45, термічно оброблена.

Загальні вимоги до виготовлення деталей:

Усі поверхні, що з'єднуються з обертовими елементами, мають шорсткість $Ra \leq 1,25$ або Ra 6,3 (відповідно до навантаження).

Допуски на отвори та вали: H14, h14, $\pm IT14/2$.

Матеріал – сталь, що забезпечує міцність, технологічність та можливість обробки.

Термообробка до твердості HRC 12–15 або HRC 21–85 для навантажених елементів.

Таким чином, проектування деталей конструкції побутового вітрогенератора реалізовано з урахуванням вимог до точності, жорсткості, ремонтпридатності й уніфікації. Всі деталі оптимізовано для виготовлення на металообробному обладнанні універсального типу.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Розробка конструкції побутового вітрогенератора

Використовуючи спроектовані деталі була розроблена конструкція вітрогенератора з вертикальною віссю обертання належить до типу Дар'є і відзначається високою надійністю, універсальністю монтажу та ефективністю роботи в умовах змінного напрямку вітру. Загальний вигляд та складові елементи конструкції подано на рисунку 2.1 (аркуш [БРМА25.00.00.000СК]).

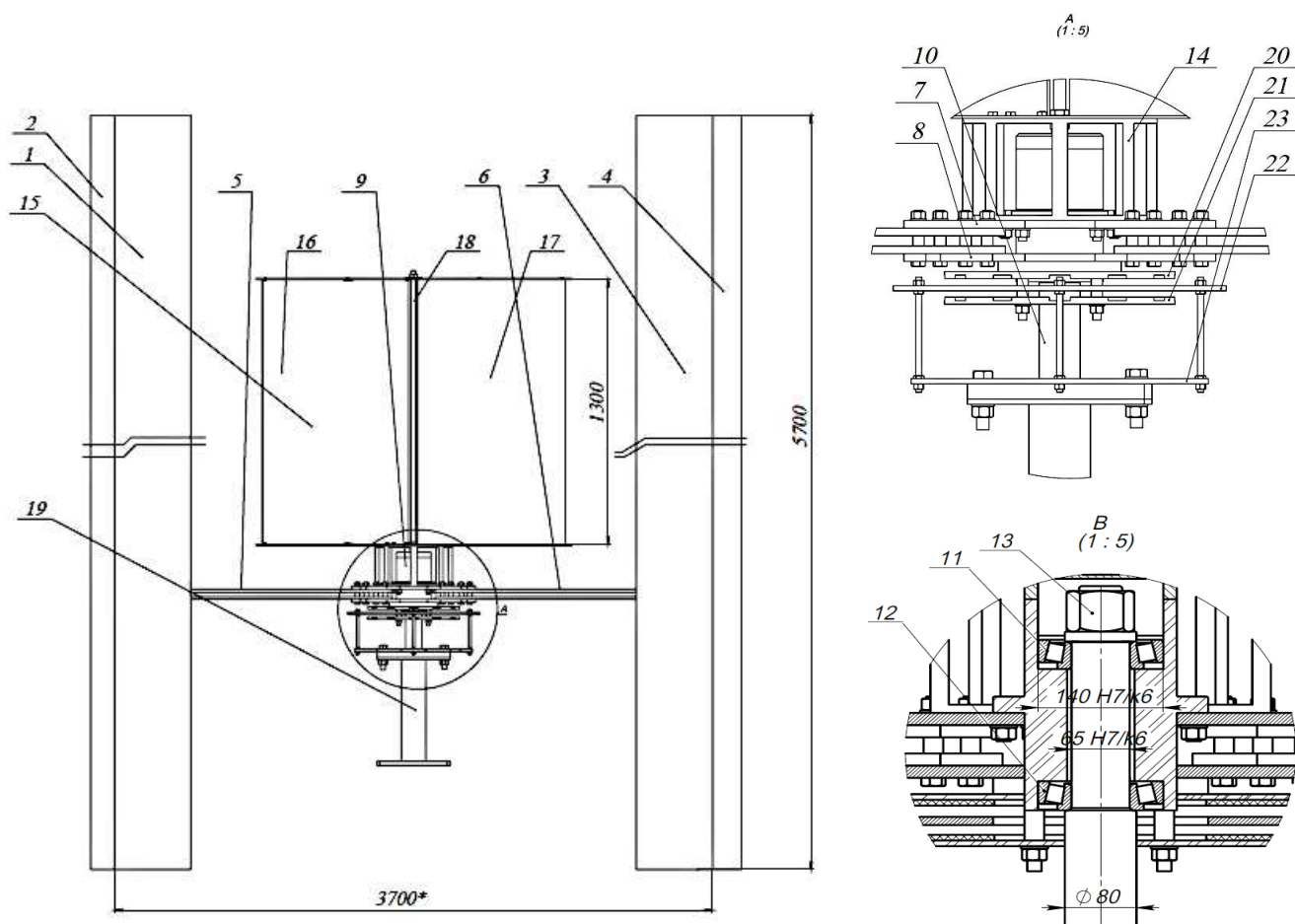
Аеродинамічну частину установки утворюють чотири основні лопаті 1, 2, 3, 4, що виконані із симетричного профілю NASA з оптимізованою відносною хордою. Кожна лопать фіксується на двох рівнях — нижньому та верхньому - за допомогою жорстких тяг-траверс 5 і 6, які з'єднують її з відповідно нижньою 7 і верхньою 8 основами. Це дозволяє досягти стабільної геометрії ротора, зменшити вібрації під час обертання та забезпечити рівномірний розподіл навантаження [19-23].

Нижня та верхня основи з'єднуються зі ступицею 9, яка є центральним вузлом обертання. Вісь обертання 10 встановлена вертикально та проходить крізь ступицю, забезпечуючи обертання всього ротора. Для зменшення втрат на тертя та підвищення ресурсу обертального вузла застосовані два високоточні радіально-упорні підшипники 11 і 12, які надійно утримують ступицю в заданому положенні. Кріплення ступиці на осі здійснюється спеціальною фіксуючою гайкою 13, що гарантує стабільність з'єднання навіть за тривалого навантаження.

Однією з важливих особливостей розробленої конструкції є наявність допоміжного стартового ротора типу Савоніуса 15, який розміщено над основним ротором. Він встановлюється на тумбі 14, що кріпиться до верхньої основи 8. Ротор Савоніуса містить дві напівциліндричні лопаті 16 і 17, змонтовані на горизонтальній осі 18. Призначення цього додаткового елемента - забезпечення самозапуску вітрогенератора за низької швидкості вітру, що є особливо важливим для роторів типу Дар'є, які працюють переважно за ра-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

хунок підйомної сили й не можуть самостійно розпочати обертання. Завдяки високому початковому крутному моменту, ротор Савоніуса ефективно розганяє систему до швидкості, з якої вже може працювати основний ротор.



1, 2, 3, 4 – лопать, 5, 6 – траверса, 7, 8 – нижня та верхня кріпильні основи, 9 – ступиця, 10 – вісь, 11, 12 – підшипник, 13 – гайка, 14 – тумба, 15 – ротор Савоніуса, 16, 17 – лопать додаткового ротора, 18 – вісь, 19 – секція щогли, 20, 21 – магнітний диск, 22 – диск з котушками, 23 – кріплення генератора

Рисунок 2.1 – Конструкція вітрового генератора:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			42

Головна вісь 10, окрім утримання ротора, виконує функцію передачі обертового моменту до нижньої секції, де встановлений електрогенератор. Вісь жорстко фіксується до початкової секції щогли 19, яка виконує роль несучої опори для всієї конструкції. Щогла модульна, може складатися з кількох секцій для забезпечення необхідної висоти установки відповідно до вітрових умов на місцевості.

У нижній частині вітрогенератора розміщено генераторний модуль, побудований за безконтактною схемою. Він містить два магнітні диски 20, 21, між якими розташований диск із котушками 22. Це дає змогу отримати електроенергію без використання щіткових вузлів, що зменшує втрати, підвищує надійність і знижує необхідність у технічному обслуговуванні. Конструкція генератора закріплюється за допомогою спеціального вузла кріплення 23, що забезпечує точну центровку та надійне позиціонування відносно ротора.

Завдяки поєднанню ротора Дар'є для основного виробництва енергії та ротора Савоніуса для старту, ця конструкція об'єднує переваги обох типів установок: високу ефективність за стабільного вітру та здатність до самозапуску при слабкому повітряному потоці. Використання модульної щогли, безконтактного генератора, а також аеродинамічно досконалих профілів лопатей дозволяє забезпечити не лише енергоефективність, а й технологічну зручність у виробництві та експлуатації установки.

Таким чином, розроблений вітрогенератор відповідає сучасним вимогам до малої вітроенергетики, є перспективним для автономного електропостачання побутових і малих виробничих об'єктів, а також придатним для застосування у складі мікроелектричних мереж (MicroGrid).

2.5 Розробка генератора для виробництва електричної енергії

Для розробленої вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання (рис.2.1) спроектовано генератор з постійними магнітами типу

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВГ–2 (28). Конструкція генератора виконана за безконтактною схемою, що забезпечує підвищену надійність, зниження зносу та відсутність необхідності у технічному обслуговуванні щіткових вузлів [20].

Конструктивна будова генератора.

На рисунку 2.1 видно, що генератор складається з трьох основних функціональних частин:

- нижній магнітний диск (20) і верхній магнітний диск (21) — обидва диски обертаються разом із ротором установки. На їхній внутрішній поверхні закріплені постійні магніти, що створюють магнітне поле під час обертання. Вони фіксуються до нижньої кріпильної основи (8) та до конструктивної частини ротора через болтові з'єднання;

- статорний диск (22) - розташований між магнітними дисками. На ньому рівномірно розміщені мідні обмотки, які виконують роль індуктивних котушок. Під час обертання магнітних дисків навколо статора в котушках індукується змінний струм. Цей диск фіксується до статичної частини конструкції через чотири шпильки до елемента кріплення генератора (23).

Купол захисту - служить для захисту вузлів генератора від пилу, вологи та механічних пошкоджень.

Таке розміщення дозволяє реалізувати осьову схему магнітної індукції, при якій магнітне поле пронизує котушки у вертикальному напрямку.

Основні характеристики спроектованого генератора ВГ-2 (28) наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні робочі характеристики генератора

№	Параметр	ВГ – 2 (28)/24-50-02В
1	2	3
1	Номінальна потужність, кВт	1,5
2	Частота обертання, об/хв	50 –500

Продовження табл.2.1.

1	2	3
3	Номинальний випрямлений струм, В	24
4	Вихідний випрямлений струм, А	50
5	Число фаз, шт.	3
6	Частота вихідного струму, Гц	50
7	Момент зрушування, Н·м	5
8	Коефіцієнт корисної дії	0,85

Залежно від розрахункової висоти установки та необхідного рівня вітрового навантаження, конструкція вітроустановки передбачає можливість нарощування її висоти за допомогою модульних щоглових секцій. Нижня секція, як основна опорна частина, жорстко фіксується до фундаментної плити або анкерного вузла, що забезпечує стійкість усієї конструкції та її надійне кріплення до основи. Фундамент виконується із залізобетону або сталевих фундаментних анкерів, залежно від умов монтажу.

Для підвищення механічної стабільності щогли, особливо при встановленні вітрогенератора на значній висоті або в районах з підвищеною швидкістю вітру, передбачається встановлення системи розтяжок. До верхньої секції щогли кріпляться натяжні троси (розтяжки) зі сталевого каната, які відводяться під кутом 30–45° і анкеруються в ґрунт або закріплюються до окремих фундаментних блоків на рівномірно розподіленій відстані по колу навколо установки.

Наявність розтяжок дозволяє:

- зменшити навантаження на центральну вісь щогли під час поривів вітру;
- забезпечити високу вібростійкість усієї конструкції;

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- знизити ризик резонансних коливань при циклічному вітровому навантаженні;

- підвищити довговічність вітроустановки та точність роботи генератора.

У випадку тимчасових або мобільних вітрових установок розтяжки також спрощують монтаж, дозволяючи уникати складних зварних з'єднань або важких фундаментів. Для натягування тросів використовуються регульовані талрепи або гвинтові натяжні механізми, які дозволяють точно відрегулювати геометрію стояння щогли в польових умовах.

Таким чином, використання щоглових секцій у поєднанні з натяжними розтяжками є конструктивно виправданим рішенням, що забезпечує стійкість, надійність і тривалу експлуатацію побутового вітрогенератора в умовах змінного навантаження та зовнішніх впливів.

2.6 Розробка моделі вертикально-осьового вітрогенератора типу Дар'є

На рисунку 2.2 представлено об'ємну 3D-модель вертикально-осьового вітрогенератора типу Дар'є, що включає:

- чотири симетричні аеродинамічні лопаті з профілем типу NASA, рівномірно розташовані навколо вертикальної осі;

- опорну конструкцію у вигляді щогли, до якої кріпиться обертовий вузол;

- допоміжний ротор Савоніуса у верхній частині - з двома напівциліндричними лопатями для старту при слабкому вітрі;

- блок генератора в нижній частині - компактний, розміщений між підшипниковими опорами.

Конструкція демонструє оптимальне поєднання функціональності й простоти для побутового використання в умовах змінного вітрового навантаження.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Рисунок 2.2 – Об’ємна 3D-модель вертикально-осьового вітрогенератора типу Дар’є

2.7 Принцип роботи вітроустановки

Основним принципом роботи вітроустановки є послідовне перетворення енергії: від кінетичної енергії вітру – у механічну енергію обертання ротора, і далі – у електричну енергію за допомогою безконтактного генератора. Запропонована конструкція побутового вітрогенератора з вертикальною віссю обертання (рис. 2.1) реалізує цей принцип у компактній та надійній формі.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Робочий процес вітроустановки починається за мінімальної швидкості повітряного потоку 4,2 м/с, коли в першу чергу в дію вступає допоміжний стартовий ротор типу Савоніуса (15). Цей ротор закріплений до верхньої частини конструкції через кріпильну основу (14), яка, в свою чергу, встановлена на ступиці (9) основного ротора. Завдяки високому початковому крутному моменту, властивому лопатям Савоніуса, система може здійснювати самозапуск без зовнішніх джерел енергії.

У момент запуску ротор Савоніуса передає обертання на спільну ступицю (9), яка приводить в рух весь обертовий блок установки. Це включає основний ротор типу Дар'є з чотирма аеродинамічними лопатями, які закріплені до ступиці через систему тяг – траверс (5, 6). Після розгону до робочої швидкості, ротор Дар'є, що має вищу ефективність перетворення енергії завдяки дії підйомної сили, перебирає основне навантаження і забезпечує стабільну генерацію електроенергії.

Під час обертання ступиця одночасно обертає верхній (20) та нижній (21) магнітні диски генератора, які жорстко з'єднані з ротором. Вони містять постійні магніти, які створюють змінне магнітне поле під час обертання. Між цими дисками розміщується нерухомий диск із мідними котушками (22), що функціонує як статор. Він жорстко закріплений до нижньої кріпильної основи генератора (23) за допомогою чотирьох шпильок, що виключає будь-які вібрації чи зсуви обмоток під час роботи.

Таким чином, коли вітер приводить у рух лопаті установки, механічна енергія обертання через ступицю передається на магнітні диски генератора, в результаті чого в котушках (22) індукується змінна електрорушійна сила. Цей струм згодом випрямляється та подається до системи енергоспоживання або акумулювання. Система є повністю автономною, не потребує електричного запуску, і забезпечує ефективне виробництво електроенергії в умовах змінного вітрового потоку.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

2.8 Розробка функціональної схеми роботи побутового вітрогенератора

На рис.2.2 (аркуш [БРМА25.00.00.000С1]) наведено функціональну схему роботи побутового вітрогенератора.

Зображена схема відображає принцип роботи побутової вітроустановки з вертикальною віссю обертання, яка реалізована в розробленій конструкції. Основна ідея полягає в тому, щоб ефективно перетворювати кінетичну енергію вітру у придатну до використання електричну енергію, яка може живити як споживачів постійного, так і змінного струму. Установа має модульну будову й здатна працювати в автономному (off-grid) режимі, забезпечуючи повну незалежність від централізованої електромережі.

Першим етапом у системі є вітроустановка з ротором типу Дар'є, який приводиться в рух силою вітру. В обертовій частині встановлено генератор з постійними магнітами, що під дією обертального моменту виробляє змінний багатofазний струм. Оскільки більшість акумуляторів та споживачів потребують постійного струму, наступним компонентом є конвертор заряду. Він виконує кілька важливих функцій:

- випрямлення змінного струму;
- стабілізація напруги;
- захист від перенапруг і перевантажень;
- керування режимами заряджання акумуляторних батарей.

Після випрямлення електроенергія надходить до блоку акумуляторів. Вони служать для накопичення енергії, що дозволяє забезпечити безперервну роботу електроспоживачів навіть у періоди, коли швидкість вітру недостатня для генерації. Це особливо важливо для побутових систем, де стабільність живлення є критичною умовою. До акумуляторів можуть бути безпосередньо підключені споживачі постійного струму, наприклад, світлодіодне освітлення, зарядні пристрої, системи сигналізації чи телекомунікаційне обладнання.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

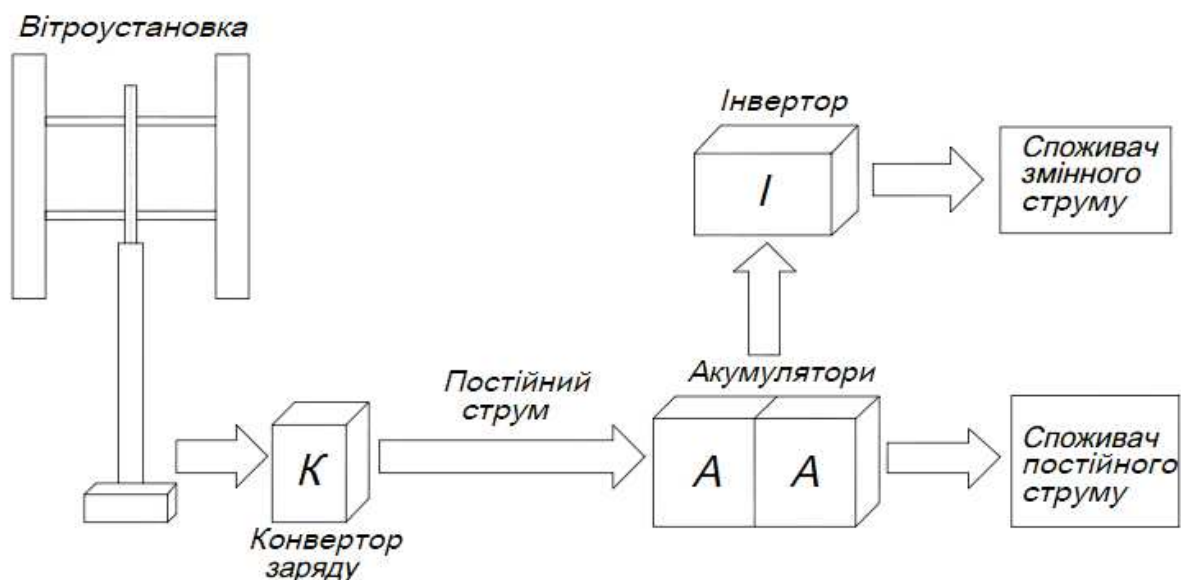


Рисунок 2.2 - Функціональна схема роботи вітроустановки

Для живлення стандартних побутових пристроїв, які працюють від змінного струму (телевізори, холодильники, насоси тощо), в системі передбачено інвертор. Він перетворює постійний струм, накопичений у батареях, на змінний струм промислового стандарту - 220 В, 50 Гц. Це дозволяє використовувати всю електроніку і побутову техніку без жодних адаптацій.

Таким чином, дана схема демонструє повний цикл перетворення енергії - від вітру до кінцевого споживача. Вона є універсальною, адаптивною, надійною в експлуатації та легко масштабованою. Такий підхід дозволяє забезпечити автономне електропостачання в умовах віддалених або малодоступних територій, а також у ситуаціях, де важлива енергетична незалежність і стабільність.

2.9 Підбір компонентів побутового енергогенеруючого пристрою

Здійснимо розширений технічний опис підібраних компонентів, які оптимально підходять для інтеграції з розробленим побутовим вітрогенератором типу ВГ-2 (28)/24-50-02В. При виборі враховувалися технічні характеристики генератора наведені в табл.2.1.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

1. Контролер заряду – Victron SmartSolar MPPT 100/50 (рис.2.3) [24].



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд контролера заряду Victron SmartSolar MPPT 100/50

Цей MPPT-контролер заряду розроблений для роботи з генераторами постійного струму і є найкращим варіантом для вітроустановки на 24 В і струм до 50 А. Його головна перевага — технологія Maximum Power Point Tracking (MPPT), яка автоматично відстежує точку максимальної потужності та забезпечує найефективніший заряд акумулятора навіть при змінних умовах вітру.

Основні характеристики:

- максимальна вхідна напруга - 100 В;
- максимальний струм заряду - 50 А;
- підтримка напруги - 12/24 В (автоматичне розпізнавання);
- ефективність: більше 98 %;
- підтримка Bluetooth для моніторингу через додаток VictronConnect;
- захист від перенапруги, перегріву, короткого замикання та неправильної полярності.

Переваги:

- сумісний з вітрогенераторами і сонячними панелями;
- здатний працювати з глибокорозрядженими акумуляторами;
- високий рівень автоматизації та гнучке налаштування.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

2. Акумуляторна батарея – PowerPlant AGM 24 V 200 Ah (рис.2.4) [25].

Це гелева (AGM) акумуляторна батарея великої ємності, спеціально розроблена для систем автономного енергоживлення. Вона ідеально підходить до системи на 24 В з генератором потужністю до 1,5 кВт.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд акумуляторної батареї
PowerPlant AGM 24 V 200 Ah

Технічні характеристики:

- напруга - 24 В;
- ємність - 200 А·г.
- тип: AGM (Absorbent Glass Mat) - не вимагає обслуговування;
- термін служби- до 10 років при правильній експлуатації;
- розрахована на глибокі цикли заряду/розряду.

Переваги:

- повна герметичність та безпечність;
- високий рівень надійності та захист від вібрацій;
- стійкість до температурних коливань, що особливо важливо для зовнішніх умов.

Цей акумулятор накопичує енергію, вироблену вітрогенератором, і забезпечує стабільне живлення споживачів у періоди слабкого або відсутнього вітру.

3. Інвертор UKC Pure Sine Wave Inverter 1500 W / 24 V (рис.2.5) [26].

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Інвертор типу чистого синуса призначений для перетворення постійного струму (24 В) у змінну напругу 220 В, 50 Гц, що відповідає побутовим стандартам електроживлення. Ця модель оптимально підходить для системи з номінальним навантаженням до 1,5 кВт.



Рисунок 2.5 - Інвертор UKC Pure Sine Wave Inverter 1500 W / 24 V

Характеристики інвертора:

- потужність номінальна - 1500 Вт, пікова - 3000 Вт (для короткочасного запуску споживачів з високим пусковим струмом);
- вхідна напруга - 24 В;
- вихід - чистий синус, стабільна напруга 220 В, 50 Гц;
- захист - від перегріву, перевантаження, короткого замикання, глибокого розряду АКБ.

Переваги:

- можливість живити електроніку та чутливі прилади (наприклад, насоси, холодильники, зарядні пристрої);
- надійна робота при тривалому навантаженні;
- компактний форм-фактор та простота монтажу.

Загальні міркування щодо сумісності системи.

Контролер MPPT Victron ефективно адаптується до змінної напруги генератора та регулює струм для оптимального заряджання акумуляторів.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Акумулятор PowerPlant забезпечує буферну ємність для живлення в нічний час або при штилі. Інвертор UKC перетворює накопичену енергію у зручний для побутового застосування формат без втрати якості електропостачання.

Ці компоненти разом формують надійну, масштабовану й економічно доцільну систему побутового електропостачання з використанням вітрогенератора потужністю до 1,5 кВт. Вони забезпечують ефективну роботу в режимі off-grid, можливість адаптації до SmartGrid у майбутньому та стійку підтримку роботи електроприладів у побутових або фермерських умовах.

2.10 Висновки до другого розділу

В другому розділі було обґрунтовано актуальність створення побутового вітрогенератора з вертикальною віссю обертання як перспективного джерела автономного енергозабезпечення для приватних та фермерських господарств. З урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, надійності, екологічності та доступності конструкції, сформовано вихідні технічні положення для розробки установки.

В ході проєктування було обрано оптимальну конструкцію ротора типу Дар'є, що поєднується зі стартовим ротором Савоніуса для забезпечення самозапуску при малій швидкості вітру. Розроблена аеродинамічна частина передбачає використання симетричного профілю лопатей типу NASA, що забезпечує підвищену ефективність при обертанні та стабільну роботу установки. Уточнено геометричні параметри конструкції, спосіб монтажу, вузли обертання, компонування щогли та кріплень.

Визначено й реалізовано основні конструктивні елементи вітрогенератора: ступицю, вісь, траверси, кріпильні основи та деталі генераторного модуля. Усі вузли спроектовано з урахуванням технологічності виготовлення на універсальному металообробному обладнанні, можливості сервісного обслуговування та ремонтпридатності.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Змодельовано 3D-представлення конструкції та описано повний принцип роботи установки з моменту запуску до подачі електроенергії споживачу. Проведено підбір сумісних компонентів електросистеми — контролера заряду, акумуляторної батареї та інвертора, які забезпечують ефективне накопичення та перетворення енергії в автономному режимі.

Таким чином, розроблений побутовий вітрогенератор повністю відповідає сучасним вимогам до мікрогенерації, є функціональним, надійним і придатним для впровадження у побутових умовах. Запропоноване технічне рішення має перспективу практичного використання, включення до освітніх лабораторій, а також подальшого масштабування в системах локальної децентралізованої енергетики.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОБУТОВОГО ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Розрахунок основних параметрів побутового вітрогенератора

Для розрахунку основних аеродинамічних і конструктивних параметрів головного вітрогенератора було обрано профіль типу NASA з відносною товщиною 18 %. Такий профіль характеризується стабільною підйомною силою, задовільною стійкістю до відриву потоку на високих кутах атаки та добрим компромісом між аеродинамічною ефективністю й механічною міцністю.

В якості геометричних варіантів були розглянуті три типорозміри лопатей з різною довжиною хорди $\bar{b} = 0,08$, $\bar{b} = 0,010$, $\bar{b} = 0,12$, що дозволило порівняти їхню ефективність при однаковому профілі. Відносна хорда, тобто відношення довжини хорди до радіуса ротора, суттєво впливає на крутний момент, коефіцієнт підйомної сили та загальну ефективність установки. Таким чином, аналіз трьох варіантів профілю з різною відносною хордовою довжиною дозволяє здійснити оптимізацію робочих характеристик вітротурбіни під задані швидкості вітру та конструктивні обмеження.

У подальшому результати цього аналізу використовуються при побудові математичної моделі, а також при створенні фізичного макета установки для експериментального дослідження.

Вихідні дані для розрахунку вітрогенератора наведено в табл.3.1.

3.1.1 Крок при числовому інтегруванні по висоті лопаті визначається із виразу:

$$\bar{z} = \frac{1}{n_z}, \quad (3.1)$$

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$\overline{ZZ} = \frac{1}{4} = 0,25 .$$

3.1.2 Відносна висота частини лопаті знаходиться із залежності:

$$\overline{Z_k} = k \cdot \overline{ZZ}, \quad (3.2)$$

де k – задана величина, $k = 1, 2, 3, 4$.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для розрахунку вітрогенератора

Найменування параметра	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Число лопатей колеса	$i_{\text{л}}$	в. о.	4
Середньорічна швидкість вітру	$V_{\text{ср.річ.}}$	м / с	5
Відносна хорда профіля	\overline{b}	в. о.	0,08-0,12
Початкове значення швидкохідності	$Z_{B_{\text{п}}}$	в. о.	1,05
Кінцеве значення швидкохідності	$Z_{B_{\text{к}}}$	в. о.	12,05
ККД електричний	$\eta_{\text{ел.}}$	в. о.	0,7
ККД механічний	$\eta_{\text{м.}}$	в. о.	0,9
Номінальна потужність	$N_{\text{п}}$	Вт	1000
Відносна половина висоти вітроколеса	\overline{h}	в. о.	1,5
Кількість кроків при числовому інтегруванні по висоті лопатей	n_z	в. о.	4

В таблиці 3.2 наведені \bar{z}_k для п'яти значень k .

Таблиця 3.2 - Значення параметра \bar{z}_k

k	0	1	2	3	4
Z_k	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00

3.1.3 Знаходимо значення безрозмірних координат $\bar{\Gamma}_k$.

Для прямих лопатей вони складають:

$$\bar{\Gamma}_k = \frac{\Gamma_k}{R} = 1. \quad (3.3)$$

3.1.4 Знаходимо кут нахилу площини проміжного перерізу лопаті

Для прямих лопатей він складе $\delta_k = 0$

3.1.5 Визначаємо коефіцієнт допоміжної швидкості колеса із формули:

$$Z_b(KK) = z_{B_n} + (z_{B_k} - z_{B_n}) \frac{KK-1}{n_{доп}-1}, \quad (3.4)$$

де $KK = 1, 2 \dots, n_{доп}$.

Згідно таблиці 3.2 : $n_{доп} = 3$; $z_{B_n} = 1,05$; $z_{B_k} = 12,05$.

Так як $n_{доп} = 3$ тоді $KK = 1, 2, 3$.

Далі визначаємо Z_b для цих значень КК:

$$\text{КК} = 1 \quad Z_b(1) = Z_{B_n} = 1,$$

$$\text{КК} = 2: Z_b(2) = 1,05 + (12,05 - 1,05) \frac{2-1}{3-1} = 6,55,$$

$$\text{КК} = 3: Z_b(3) = 1,05 + (12,05 - 1,05) \frac{3-1}{3-1} = 12,05,$$

Було прийнято $Z_b = 6,55$.

3.1.6 Знаходимо максимальний за модулем кут атаки проміжного перерізу за формулою:

$$|\alpha_{\max_K}| = \left| \arctg \left(\frac{\cos \delta_K}{\sqrt{(Z_b \cdot \bar{r}_K)^2 - 1}} \right) \right|, \quad (3.5)$$

При $Z_b = 6,55 \quad \cos \delta_K = 1, \quad \bar{r}_K = 1$

$$|\alpha_{\max_K}| = \left| \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{(6,55 \cdot 1)^2 - 1}} \right) \right| = 1,367^\circ. \quad (3.6)$$

3.1.7 Визначаємо величини двох азимутних кутів, які відповідають максимальному по модулю куту атаки за формулою:

$$\theta_{K1} = \arccos \left(-\frac{1}{Z_b \cdot \bar{r}_K} \right), \quad (3.6)$$

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

$$\theta_{K1} = \arccos\left(-\frac{1}{6,55 \cdot 1}\right) = 98,78^\circ,$$

$$\theta_{K2} = -\arccos\left(-\frac{1}{Z_b \cdot \bar{r}_k}\right) + 360, \quad (3.7)$$

$$\theta_{K2} = -\arccos\left(-\frac{1}{6,55 \cdot 1}\right) + 360 = 261,22^\circ.$$

3.1.8 Знаходимо мінімальне значення радіуса \bar{r}_k при числовому інтегруванні із виразу:

$$\bar{r}_{\min} = \frac{1}{Z_b} + \varepsilon, \quad (3.8)$$

де ε – задане мале позитивне число, $\varepsilon = 0,001$.

Тоді:

$$\bar{r}_{\min} = \frac{1}{6,55} + 0,001 = 0,1537$$

3.1.9 Визнаємо азимутні кути θ_i (табл.3.3):

$$N_\theta = \frac{2\pi}{n_\theta}, \quad (3.9)$$

де n_θ – число кроків при числовому інтегруванні, $n_\theta = 3$.

Підставивши значення отримаємо:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

$$H_{\theta} = \frac{2 \cdot 3.14}{3} = 2,094 = 120^{\circ}$$

$$\theta_i = i \cdot H_{\theta}, \quad (3.10)$$

де i – діапазон значень

Таблиця 3.3 – Значення кута θ_i і пов'язаних із ним параметрами

i	0	1	2	3
θ_i , рад	0	2,094	4,188	6,283
$\sin(\theta_i)$	0	0,866	- 0,866	0
$\cos(\theta_i)$	1	- 0,5	- 0,5	1

3.1.10 Визначаємо значення кутів атаки за формулою:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{-\sin \theta_i \cdot \cos \delta_k}{Z_b \cdot \bar{r}_k + \cos(\theta_i)} \quad (3.11)$$

Для першого кроку по \bar{Z}_k отримуємо:

$$\cos \delta_k = 1, r_k = 1;$$

Для чотирьох значень θ_i було отримано:

$$i = 1, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{0}{\operatorname{const}} = 0, \quad \alpha = 0,$$

$$i = 1, \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{-0,866 \cdot 1}{6,55 \cdot 1 - 0,5} = -0,143, \quad \alpha = -8,146^\circ,$$

$$i = 2, \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{-(-0,866 \cdot 1)}{6,55 \cdot 1 - 0,5} = 0,143, \quad \alpha = 8,146^\circ,$$

$$i = 3, \quad \operatorname{tg}\alpha = 0, \quad \alpha = 0^\circ.$$

3.1.11 Визначаємо коефіцієнт швидкохідності C_{ya} і C_{xa} за визначеним кутом атаки i за заданими початковими даними аеродинамічних характеристиках профілю:

Тоді:

Отримання C_{ya} і C_{xa} для $\alpha = 0^\circ$.

Згідно [10], точка $\alpha = 0^\circ$ належить до масиву α .

Номер цього числа 4. Виходячи з цього C_{ya} і C_{xa} – табличні значення, відповідають також номеру 4:

$$C_{ya} = C_{ya}(4) = 0,$$

$$C_{xa} = C_{xa}(4) = 0,088.$$

Отримання C_{ya} і C_{xa} для $\alpha = -8,146^\circ$ яке розташоване в крайній лівій частині таблиці. Тоді отримуємо значення:

$$DA_1 = \frac{a_i - a_i(1)}{a_i(2) - a_i(1)}, \quad (3.12)$$

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

де a_i – коефіцієнт підйомної сили, відносно присвоєних точок згідно [10];

$$DA_1 = \frac{-8,146^\circ - (-8^\circ)}{-4^\circ - (-8^\circ)} = -0,365,$$

$$C_{ya} = C_{ya}(1) + DA_1 (C_{ya}(2) - C_{ya}(1)), \quad (3.13)$$

де $C_{ya}(1), C_{ya}(2)$ – коефіцієнти підйомної сили;

$$C_{ya}(1) = -0,3, C_{ya}(2) = -0,6 \text{ згідно [10].}$$

Тоді:

$$C_{ya} = -0,6 + (-0,365) \cdot (-0,3 - (-0,6)) = -0,611,$$

$$C_{xa} = C_{xa}(1) + DA_1 (C_{xa}(2) - C_{xa}(1)), \quad (3.14)$$

$$C_{xa} = -0,032 + (-0,0365) \cdot (0,018 - 0,032) = 0,03251.$$

Таблиця 3.4 – Значення параметрів $\theta_i, \alpha^\circ, C_{ya}$ і C_{xa}

θ_i , рад	a_i	$C_{ya}i$	$C_{xa}i$
$\theta_1 = 0$	0°	0,0	0,0088
$\theta_2 = 2,094$	$-8,146^\circ$	- 0,611	0,0325
$\theta_3 = 4,189$	$8,146^\circ$	0,6098	0,0329
$\theta_4 = 6,263$	0°	0,0	0,0088

3.1.12 Квадрат проєкції відносної швидкості вітру на площину профіля визначається наступним чином:

$$Z_{bbi}^2 = \left(\frac{W_{\text{проф}}^2}{V_1^2}\right)_i = (Z_b \cdot \bar{r}_k + \cos \theta_i)^2 + \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \delta_k, \quad (3.15)$$

де $i = 0, 1, 2, 3$.

Здійснюємо розрахунок Z_{bbi}^2 для третього кроку:

$$\bar{r}_k = 1, \theta_3 = 4,189, \cos \theta_3 = -0,5, \sin \theta_3 = -0,866,$$

$$Z_{bbi}^2 = (6,55 \cdot 1 + (-0,5))^2 + (-0,866)^2 \cdot (1)^2 = 7,55$$

Величини Z_{bbi}^2 для інших кутів представлені в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Значення параметра Z_{bbi}^2

$\theta = 0$, рад	$\theta = 2,094$, рад	$\theta = 4,189$, рад	$\theta = 6,283$, рад
7,55	7,4	7,4	7,55

3.1.13 Коефіцієнти компонентів аеродинамічних сил, які діють на профіль в напрямку до хорди профіля:

$$C_{t_i} = -C_{y_{a_i}} \cdot \sin \alpha_i + C_{x_{a_i}} \cdot \cos \alpha_i, \quad (3.16)$$

$$C_{n_i} = -C_{y_{a_i}} \cdot \cos \alpha_i + C_{x_{a_i}} \cdot \sin \alpha_i, \quad (3.17)$$

$$\bar{r}_k = 1, \theta_3 = 4,189,$$

$$C_{t_i} = -0,6172 \cdot \sin(8,29^\circ) + 0,0337 \cdot \cos(8,29^\circ) = -0,0544,$$

$$C_{n_i} = 0,6172 \cdot \cos(8,29^\circ) + 0,0334 \cdot \sin(8,29^\circ) = -0,6094.$$

В таблиці 3.6 представлені величини, $\theta_i, Z_{bbi}, C_{t_i}$ і C_{n_i} для інших кутів.

Таблиця 3.6 – Величини $\bar{Z}_k, \theta_i, Z_{bbi}, C_{t_i}$ і C_{n_i}

$\theta_i, \text{рад}$	Z_{bbi}	C_{t_i}	C_{n_i}
0	7,55	0,0088	0,0
2,094	7,4	- 0,0544	- 0,6094
4,189	7,4	- 0,0537	0,6072
6,263	7,55	0,0088	0,0

3.1.14 Внутрішній інтеграл $I(\bar{z})$ для визначення функції G знаходиться із:

$$I(\bar{z}) = \frac{H_\theta}{2} (f(0, \bar{z}) + f(2\pi, \bar{z}) + 2 \sum_{i=1}^{n_\theta-1} f(\theta_i, \bar{z})), \quad (3.18)$$

де n_θ – число відрізків при числовому інтегруванні за кутом;

H_θ – крок по азимутному куту θ .

Було прийнято $n_\theta = 3$.

Тоді:

$$H_{\theta} = \frac{2\pi}{3}, \quad (3.19)$$

$$H_{\theta} = \frac{2 \cdot 3,14}{3} = 2,094,$$

$$I(\bar{Z}) = \frac{H_{\theta}}{2} (f(0, \bar{Z}) + f(2\pi, \bar{Z}) + 2(f(\theta_1, \bar{Z}) + f(\theta_2, \bar{Z}))), \quad (3.20)$$

де $\theta_1 = 1 \cdot H_{\theta} = 2,094$ рад;

$\theta_2 = 2 \cdot H_{\theta} = 4,189$ рад;

$f(\theta_1, \bar{Z})$ - підінтегральна функція внутрішнього інтегралу для визначення числа G ;

$$f(\theta_1, \bar{Z}) = Z_{bb}^2 \left(-C_n \cdot \sin\theta + C_t \frac{\cos\theta}{\cos\delta} \right), \quad (3.21)$$

Розраховуємо функцію $f(\theta, \bar{Z})$ для чотирьох значень θ :

$$f(\theta, \bar{Z}) = 7,55 \left(0 \cdot \sin(0) + 0,088 \frac{\cos(0)}{1} \right) = 0,664,$$

$$f(2\pi, \bar{Z}) = 7,55 \left(0 \cdot \sin(0) + 0,088 \frac{\cos(2\pi)}{1} \right) = 0,66,$$

$$f(\theta_1, \bar{Z}) = 7,4 \left(0,6094 \cdot \sin(2,094) - 0,0544 \frac{\cos(2,094)}{1} \right) = 4,45,$$

$$f(\theta_2, \bar{Z}) = 7,4(-0,6072(-0,866) + (-0,0537)\frac{(-0,5)}{1}) = 4,16.$$

Тоді:

$$I(\bar{Z}) = \frac{2,094}{2}(0,664 + 0,66 + 2(4,45 + 4,16)) = 19,41.$$

3.1.15 Значення виразу G для прямих лопатей визначається із формули:

$$G = \frac{i_l \cdot v}{\frac{16}{3} \pi} I_1, \quad (3.22)$$

де v – хорда лопатей;

i_l - число лопатей.

Підставивши значення було отримано:

$$G = \frac{4 \cdot 0,08}{\frac{16}{3} \cdot 3,14} 19,41 = 0,37.$$

3.1.16 Відносна швидкість внизу потоку знаходиться із виразу:

$$\bar{V}_2 = \frac{1 - G}{1 + G}, \quad (3.23)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1 - 0,37}{1 + 0,37} = 0,45.$$

3.1.17 Коефіцієнт швидкохідності знаходиться з формули:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

$$Z = Z_b \frac{1 + \bar{V}_2}{2}, \quad (3.24)$$

$$Z = 6,55 \frac{1 + 0,45}{2} = 4,8.$$

3.1.18 Визначення внутрішнього інтегралу $I_c(\bar{Z})$, який входить у вираз для коефіцієнта потужності:

$$I_{c1}(\bar{Z}) = \frac{H_\theta}{2} (f_c(0, \bar{Z}) + f_c(2\pi, \bar{Z}) + 2 \sum_{i=1}^{n_\theta-1} f_c(\theta_i, \bar{Z})), \quad (3.25)$$

Для чотирьох значень θ_i : $\theta_0 = 0$, $\theta_1 = 2,094$, $\theta_2 = 4,189$, $\theta_3 = 2\pi$,

$$f(0, \bar{Z}) = -0,661,$$

$$f(2\pi, \bar{Z}) = -0,65,$$

$$f(\theta_1, \bar{Z}) = 0,41,$$

$$f(\theta_2, \bar{Z}) = 2,5.$$

Підставивши значення було отримано:

$$I_{c1}(1) = \frac{2,094}{2} (-0,661 - 0,66 + 2 \cdot (0,41 + 2,5)) = 4,6.$$

3.1.19 Коефіцієнт потужності для прямих лопатей знаходиться із виразу:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

$$C_P = \frac{i_{\text{л}} \cdot B(1 + \bar{V}_2)^3 \cdot Z_B}{\frac{64}{3}\pi} I_{c1} , \quad (3.26)$$

$$C_P = \frac{4 \cdot 0,08(1 + 0,45)^3 \cdot 6,55}{32 \cdot 3,14} 4,6 = 0,31 .$$

3.1.20 Розрахунок потужностей і моментих характеристик

Для розрахованого при $Z_b = 6,55$ коефіцієнта швидкохідності $Z = 4,8$ коефіцієнт потужності складає $C_P = 0,31$.

Інші значення Z_b , коефіцієнти Z , C_P наведені у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Значення величин Z_b , Z , C_P , C_m

Z_b	Z	C_P	C_m
1,05	0,78	0,00	0,0
6,55	4,8	0,31	0,064
12,05	9,25	0,064	0,0069

3.1.21 Знаходження робочої точки лопаті

Максимальне значення коефіцієнта швидкохідності точка $C_P = 0,31$, даної точки швидкохідності $Z = 4,8$:

$$\begin{cases} P_{\text{max}} = 0,31 \\ Z_{\text{opt}} = 4,8 . \end{cases}$$

3.1.22 Знаходимо абсцису точки перерізу кривої $C_p(Z)$:

точка 2

$$\begin{cases} Z_2 = 4,8 \\ C_{p2} = 0,31, \end{cases}$$

точка 3

$$\begin{cases} Z_3 = 9,25 \\ C_{p3} = 0,064, \end{cases}$$

$$Z_{max} = Z_{n-1} - C_{p_{n-1}} \frac{Z_n - Z_{n-1}}{C_{p_n} - C_{p_{n-1}}}, \quad (3.27)$$

де $n = 3, n - 1 = 2$

$$Z_{max} = 4,8 - 0,31 \frac{9,25 - 4,8}{0,059 - 0,31} = 10,2.$$

При заданому коефіцієнті абсциси робочої точки $k_z = 0,25$ було знайдено абсцису робочої точки:

$$Z_{p.t.} = Z_{opt} + (Z_{max} - Z_{opt}) \cdot k_z, \quad (3.28)$$

$$Z_{p.t.} = 4,8 + (9,25 - 4,8) \cdot 0,25 = 5,9.$$

3.1.23 Проводимо уточнення коефіцієнта потужності робочої точки за формулою:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

$$C_{P_{p.т}} = C_{P_2} + (C_{P_3} - C_{P_2}) \frac{Z_{p.т} - Z_2}{Z_3 - Z_2}, \quad (3.29)$$

$$C_{P_{p.т}} = 0,31 + (0,064 - 0,31) \frac{5,9 - 4,8}{9,25 - 4,8} = 0,25.$$

Отже при врахуванні заданих коефіцієнтів кінцевий коефіцієнт використання потужності і швидкохідність рівняються: $C_P(Z) = 0,25$, $Z = 5,9$.

3.1.24 Проводимо визначення розмірних параметрів

Вихідні дані для розрахунку.

Згідно табл. 3.2 номінальна потужність $N = 1000$ Вт, середньорічна швидкість вітру 5 м / с, густина повітря $\rho = 1,23 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, Загальний коефіцієнт корисної дії складає $0,67$.

Половина відносної висоти лопаті вздовж радіуса визначається із виразу:

$$\bar{h} = \frac{h}{R} = 1,5.$$

Відносна хорда вздовж радіуса знаходиться із залежності:

$$\bar{b} = \frac{b}{R} = 0,08$$

3.1.25 Визначаємо розрахункову швидкість вітру

Середньорічна швидкість вітру є рівною $V_{\text{ср.річ.}} = 5 \text{ м/с}$. Розрахункова швидкість вітру знаходиться за формулою:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V = 2,5 + V_{\text{ср.річ.}}, \quad (3.30)$$

$$V = 2,5 + 5 = 7,5 \text{ м/с.}$$

3.1.26 Знаходження геометрії вітроколеса із формули:

$$D_3 = \sqrt{\frac{N}{C_p \frac{\rho \cdot V^3}{2} h \cdot n_{\text{зар}}}}, \quad (3.31)$$

Тоді:

$$D_3 = \sqrt{\frac{1000}{0,25 \frac{1,2 \cdot 7,5^3}{2} 1,5 \cdot 0,67}} = 3,8 \text{ м.}$$

3.1.27 Максимальний радіус вітроколеса знаходиться із виразу:

$$R_3 = \frac{D_3}{2} = \frac{3,8}{2} = 1,9 \text{ м.}$$

3.1.28 Частота обертання колеса визначається із формули:

$$n_{\text{об}} = \frac{60Z \cdot V}{D \cdot \pi}, \quad (3.32)$$

$$n_{\text{об}} = \frac{60 \cdot 4,8 \cdot 7,5}{3,8 \cdot 3,14} = 181,025 \frac{\text{об.}}{\text{хв.}}$$

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

3.1.29 Хорда профіля визначається з:

$$b = \bar{b} \cdot D, \quad (3.33)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$b = 1,6 \cdot 0,08 \cdot 3,8 = 487 \text{ мм.}$$

3.1.32 Половина висоти колеса визначається із виразу:

$$h = \bar{h} \cdot R, \quad (3.34)$$

$$h = 1,5 \cdot 1,9 = 2,85,$$

3.1.33 Визначення крутного моменту на вихідному валу вітрогенератора $M_{кр}$ з формули:

$$M_{кр} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot R^2 \cdot h \cdot V^2}{Z}, \quad (3.35)$$

де C_p - коефіцієнт використання енергетичного потоку;

R - радіус лопаті;

ρ – густина повітряного потоку;

V – швидкість повітряного потоку;

h - висота лопаті;

Z – швидкохідність ротора.

Тоді:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

$$M_{кр} = \frac{0,25 \cdot 1,23 \cdot 1,9^2 \cdot 5,7 \cdot 7,5^2}{5,9} = 60,32 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Згідно даної методики [10] було здійснено розрахунок ще двох профілів лопатей з відносною хордою профіля $\bar{b} = 0,010$, $\bar{b} = 0,12$.

Основні розрахункові параметри установок.

Основні розрахункові параметри першого ротора з відносною хордою, що дорівнює $b=0,08$:

- висота ротора $H = 5700$ мм;
- коефіцієнт застосування потоку повітря $C_p(Z) = 0,25$;
- швидкохідність $Z = 5,9$;
- діаметр $D = 3800$ мм;
- розміри профілю лопаті $487 - 97$ мм.

Симетричний профіль NASA з хордою $b = 0,08$ мм показано на рис.3.1.

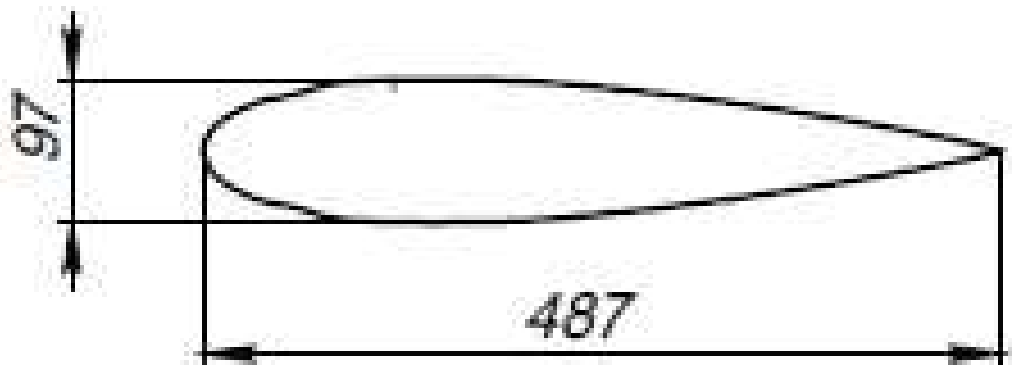


Рисунок 3.1 - Симетричний профіль NASA з хордою $b = 0,08$ мм

Основні розрахункові параметри другого ротора з відносною хордою $b=0,10$:

- висота ротора $H = 6000$ мм;
- коефіцієнт застосування потоку повітря $C_p(Z) = 0,24$;
- швидкохідність $Z = 5,44$;
- діаметр $D = 4000$ мм;

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

- розміри профілю лопаті 640-123 мм.

Симетричний профіль NASA з хордою $b = 0,10$ мм представлено на рис.3.2.

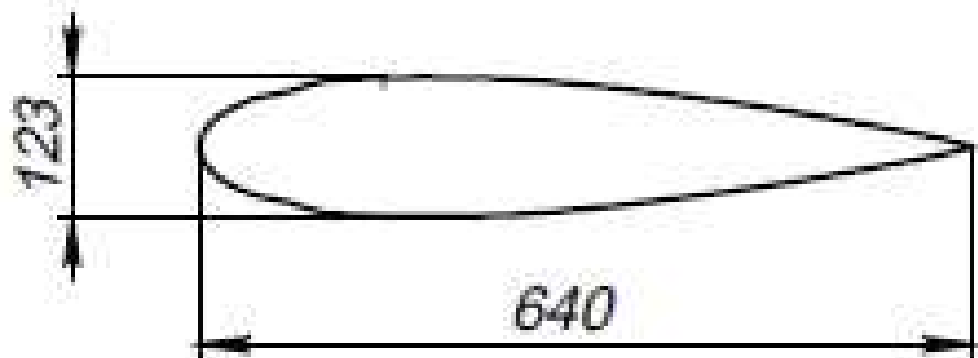


Рисунок 3.2 - Симетричний профіль NASA з хордою $b = 0,10$ мм

Основні розрахункові параметри третього ротора з відносною хордою, що рівняється $b=0,12$:

- коефіцієнт застосування потоку повітря $C_p(Z) = 0,22$;
- діаметр $D = 4100$ мм;
- швидкохідність $Z = 5,07$;
- висота ротора $H = 6200$ мм;
- розміри профілю лопаті 787 - 151 мм.

Симетричний профіль NASA з хордою $b = 0,12$ мм наведено на рис.3.3.

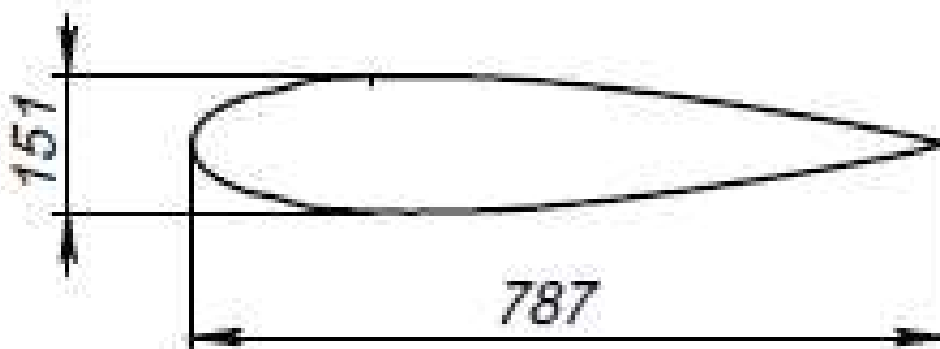


Рисунок 3.3 - Симетричний профіль NASA з хордою $b = 0,12$ мм

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Серед трьох розглянутих варіантів роторів для подальших розрахунків, конструювання та експериментального дослідження було обрано перший варіант. Це обумовлено тим, що при значенні хорди профілю $b=0,08$ він демонструє найвищий коефіцієнт використання енергії повітряного потоку. Крім того, його габаритні розміри є найменшими серед порівнюваних варіантів, що сприяє зменшенню матеріаломісткості та вартості виготовлення всієї конструкції вітрогенератора.

3.2 Розрахунок додаткового ротора Савоніуса

Оскільки ротор Дар'є не здатен до самозапуску через специфіку дії підйомної сили, для ініціалізації його обертання застосовується допоміжний стартер - ротор Савоніуса. Цей елемент працює на основі сили лобового тиску повітря на лопаті, забезпечуючи високий початковий крутний момент. На основі попередніх розрахунків було обрано конфігурацію з двома лопатями. Основні геометричні та технічні параметри цього стартового ротора:

- діаметр $D = 1500$ мм;
- висота ротора $H = 1300$ мм;
- швидкохідність $Z = 4,3$.
- коефіцієнт застосування потоку повітря $C_p(Z) = 0,14$,
- початковий крутний момент $M_{кр} = 45,3$ Н · м.

3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було здійснено комплексний розрахунок основних геометричних, аеродинамічних і енергетичних параметрів побутового вітрогенератора з вертикальною віссю обертання. В основі проектування лежить вибір симетричного аеродинамічного профілю типу NASA з відносною тов-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щиною 18 %, що забезпечує прийнятне поєднання підйомної сили та конструктивної надійності.

Порівняльний аналіз трьох варіантів профілю з різними значеннями відносної хорди ($b = 0,08; 0,10; 0,12$) дозволив визначити оптимальний варіант. Найкращі характеристики ефективності та габаритів показав перший ротор із відносною хордою $b = 0,08$, який було обрано для подальшої розробки. Його застосування дає змогу зменшити матеріаломісткість конструкції та одночасно забезпечити високий коефіцієнт використання енергії вітру.

Було виконано покроковий розрахунок швидкохідності, крутного моменту, коефіцієнтів потужності, кута атаки, інтегралів та інших ключових параметрів, що лягли в основу визначення конструктивних розмірів вітрокола (діаметр, висота, частота обертання). Розрахунки підтвердили можливість досягнення номінальної потужності 1 кВт за середньорічної швидкості вітру 5 м/с, що відповідає умовам експлуатації в побутових чи мікромережових системах.

Окремо обґрунтовано використання стартового ротора типу Савоніуса для ініціалізації обертання основного ротора Дар'є. Розрахунок параметрів стартера (діаметр, висота, швидкохідність, початковий крутний момент) підтвердив його здатність забезпечити пусковий режим навіть при невеликих швидкостях вітру.

Таким чином, розділ закладає аналітичну основу для побудови експериментального зразка установки та переходу до етапу моделювання і подальших натурних випробувань.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

ВИСНОВКИ

У межах виконаної бакалаврської роботи було всебічно досліджено, проєктно обґрунтовано та реалізовано побутовий енергогенеруючий пристрій - вітрогенератор з вертикальною віссю обертання, орієнтований на автономне використання в умовах малих господарств, дач, приватних будинків або об'єктів без підключення до централізованої електромережі.

У першому розділі здійснено аналіз поточного стану вітроенергетики з акцентом на вертикально-осьові вітроустановки. Визначено їх конструктивні особливості, переваги та недоліки, проаналізовано світовий і національний досвід застосування ВВО, зокрема їхню придатність до роботи в умовах змінного вітрового потоку. Наведено математичні залежності для оцінки потужності повітряного потоку, виконано побудову залежностей та класифікацію вітроустановок за рядом критеріїв. Окремо охарактеризовано три типи схем енергетичного підключення (off-grid, on-grid, гібридна) з оцінкою їх придатності для малої енергетики.

Другий розділ присвячено безпосередньо розробці конструкції побутового вітрогенератора типу Дар'є. У ньому обґрунтовано актуальність вибору саме цього типу ротора для автономного електрозабезпечення, визначено необхідні технічні вимоги та виконано розробку конструктивних елементів установки. Передбачено використання стартового ротора типу Савоніуса для забезпечення самозапуску. Усі деталі розроблено згідно з вимогами машинобудівного проєктування з урахуванням технологічності, ремонтпридатності та уніфікації. Створено 3D-модель установки, реалізовано функціональну схему та підібрано відповідне електротехнічне обладнання (контролер заряду, акумулятор, інвертор), що забезпечує роботу системи в автономному режимі.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

У третьому розділі здійснено глибокий інженерний розрахунок ключових аеродинамічних та енергетичних параметрів установки. Вибрано профіль типу NASA із відносною товщиною 18 % і оптимізовано відносну хорду. На основі аналізу трьох конструктивних варіантів визначено конфігурацію, яка забезпечує найкраще співвідношення між габаритами, масою і енергетичною ефективністю. Проведено повний розрахунок потужності, крутного моменту, швидкохідності та розмірів ротора. Також аналітично обґрунтовано параметри стартового ротора, що дозволяє забезпечити пуск системи при швидкості вітру від 4,2 м/с.

Таким чином, у бакалаврській роботі повністю реалізовано цикл інженерного проектування побутової вітроенергетичної установки - від теоретичного аналізу до створення технічної документації, 3D-моделі та підбору сумісного обладнання. Отримані результати можуть бути використані як для створення функціонального прототипу, так і в навчальному процесі підготовки фахівців у галузі відновлюваної енергетики, мехатроніки та енергетичного машинобудування.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вітрова енергетика, переваги та недоліки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tepla.com.ua/vitrova-energetika-perevagi-ta-nedoliki/>.
2. Вітроенергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://altesco.in.ua/ua/tekhnohohiyi/vitroenergetyka>.
3. Історична сторінка: виникнення та розвиток вітроенергетики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energivpu7.wixsite.com/osvita/kopiya-vitroenergetika-1>.
4. Левківська, Л. В. Вітроенергетика України: сучасний стан та прогнози на майбутнє / Л. В. Левківська, С. А. Левківський // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIII міжнародної науково-практичної конференції, [Київ], 19-20 травня 2022 р. / Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. - Київ, 2022. — С. 191-193.
5. Вітроенергетика і перспективи її розвитку в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://saee.gov.ua/static-objects/saee/imported_content/679269ad9ebc8.pdf.
6. Мельничук М.Д. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко – К: “Аграр Медіа Груп”, 2011. – 612 с.
7. Енергія вітру [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.lu/jfosqe>.
8. Вітрогенератори - все про енергію вітру [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.led.paytex.com.ua/post/vitrogeneratoriy-vse-pro-energiyu-vitru>
9. Класифікація ВЕУ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_4/page5.html.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

10. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.

11. Пат. 86254 UA, МПК F03D 3/06 Вертикальноосьовий вітряк. / Адаменко О. І. - № 67131А; Заявлено 15.07.2003; Опубл. 15.06.2004– 4 с.

12. Пат 52242 UA, МПК F03D 3/04 Ротор типу Савоніуса, з вертикальною віссю обертання. Письменний О. С. – № 16; Заявлено 03.12.2009; Опубл. 25.08.2010– 4 с.

13. Пат. 89721 UA, МПК F03D 3/00 Вітрогенератор із двома спів-вісними турбінами. / Шевченко Ю. В. – № 46311; Заявлено 03.08.2009; Опубл. 10.12.2009 – 4 с.

14. В.С. Кривцов. Невичерпна знергія. Кн. 2. Вітроенергетика / В.С. Кривцов, Л.М. Олійников, Л.І. Яковлев. - Підручник. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.

15. Пат 46311 UA, МПК F03G 7/00 Вітроустановка барабанного ти-пу з вертикальною віссю обертання / Філатов С. Я. - № 23; Заявлено 04.9.2009; Опубл. 10.12.2009 – 6 с.

16. Пат 52242 UA, МПК F03D 3/04 Ротор типу Савоніуса, з вертикальною віссю обертання. Письменний О. С. – № 16; Заявлено 03.12.2009; Опубл. 25.08.2010– 4 с.

17. Контролери заряду для вітрогенераторів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prel.prom.ua/g26375645-kontroleri-zaryadu-dlya>

18. Вітряні або сонячні електростанції? Особливості використання землі під проекти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eds-development.com/vitryani-abo-sonyachni-elektrostancii-osoblivosti-vikoristannya-zemli-pid-proekti/> .

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

19. Вітрогенератор для приватного будинку своїми руками [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://220lviv.top/vitrohenerator-dlia-pryvatnoho-budynku/>.

20. Кудря С.А., Пермінов Ю.М., Буденний І.В. Особливості проектування вітрогенераторів. Відновлювальна енергетика. - Київ, 2014. № 3. - С. 54-57.

21. Обухов С.Г. Вітроенергетичні установки малої потужності. Технічні характеристики, моделювання, раціональний вибір // Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. №3. 88 с.

22. Головка, В. М. Вітроенергетика: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» / В.М. Головка; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 88 с.

23. Богатирєв Н.І., Креймер А.С. Імітаційне моделювання вітроенергетичної установки. Київ: Основа, 2000. 416 с.

24. SmartSolar MPPT 100/30 & 100/50 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.victronenergy.com/solar-charge-controllers/smartsolar-100-30-100-50?utm_source=chatgpt.com.

25. Акумулятор PowerPlant LiFePO4 24V 200Ah [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://powerplant.ua/lifepo4-battery-powerplant-24v-200ah-lfp24200/>

26. Інвертор перетворювач UKC 1500W 24V AC/DC SSK [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-miks.com.ua/avto/inventory/invertor-24v-1500w>.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83