

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка вітрового генератора для
домашнього застосування

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка


Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу група ЕТс-22-2


Підпис

І.В. Саврацький
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Г.М. Драпак
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

О.Г. Тимошук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

В.С.Неймак
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

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

2 . 06 . 2025р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Саврацький Ілля Валерійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка вітрового генератора для домашнього застосування

керівник роботи Драпак Георгій Мефодійович, к.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 побутових вітрогенераторів

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

Вступ. 1. Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи. 2. Розробка конструкції вітроенергоустановки. 3. Розрахунки вітроенергоустановки. Перелік джерел посилання.

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

1. Класифікація вітроенергоустановок (ДО, А1). 2. Вітроенергоустановка (ВЗ, 2А1). 3. Вітроенергоустановка (ЕЗ, А2). 4. Автоматичний регулятор навантаження (Е1, А2). 5. Вал (ДД, А1).

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	Примітка
1. Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи.	до 20.05.25р.	
2. Розробка конструкції вітроенергоустановки	до 29.05.25р.	
3. Розрахунки вітроенергоустановки	до 5.06.25р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 8.06.25р.	

Студент


Підпис

І.В. Саврацький
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Г.М. Драпак
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові Саврацький Ілля Валерійович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка вітрового генератора для домашнього застосування

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

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 60

5 Використання малопотужних ВЕУ, що випускаються промисловістю на території республіки малоефективне, оскільки для забезпечення їх роботи необхідні швидкості вітрового потоку 7 м/с і більш. Актуальність проблеми визначила завдання ефективного використання малих швидкостей вітру. Метою роботи є розробка й дослідження ВЕУ ефективно працюючої в діапазоні швидкостей вітру 2-6 м/с, що має малі масогабаритні розміри, що легко транспортується. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено аналіз обладнання та патентної інформації з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснюється розробка конструкції вітроенергоустановки. В третьому розділі проведено розрахунки вітроенергоустановки.

Підпис студента Саврацький

" 2 " 06 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 6 від " 26 " 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 4/5

Рекомендації ЕК —

Особливі відмітки —

Технічний секретар БСД

" 26 " 06 2025 р.

не дає можливості встановити умови роботи вітрового колеса, що необхідні для досягнення такого енерговідбору. Варто зазначити, що під час виведення критерію Бетца не враховувалися динамічні ефекти взаємодії потоку з вітровим колесом.

В умовах, наближених до дійсності, коли повітря протікає крізь лопать, виникають вихрові потоки й турбулентність. Це призводить до закручування повітря в площині вітрового колеса, тобто до його обертання відносно вектора швидкості набігаючого потоку, а також до хаотичного коливання швидкості потоку за величиною й напрямком.

В рамках класичної теорії визначення моменту, що обертає вал вітроколеса, потужність розраховується за величиною лобового тиску. Такий підхід ігнорує закон збереження моменту імпульсу в системі "вітроколесо - набігаючий потік". Хоча й зрозуміло, що повітряний потік має закручуватися у напрямку, протилежному обертанню вітроколеса, й у точному аналізі цю турбулентність потрібно враховувати.

Зрозуміло, збільшення вихідної потужності вітроенергетичних установок досягне кількома способами, як з використанням динамічних процесів, які відбуваються природним шляхом в системах, так і шляхом застосування додаткових "штучних" пристроїв, таких, наприклад, як конфузори, спрямовуючі дифузори, генератори вихорів тощо.

На нашу думку, більш коректним та послідовним є вивчення аеродинамічної взаємодії повітряного потоку з біроторною конструкцією вітродвигунів. Для визначення основних параметрів біроторних співвісних вітродвигунів, таких як вихідна потужність, частота обертання першого та другого вітроколеса, крутні моменти, що ними генеруються, і мінімально можливі масогабаритні показники, необхідно правильно оцінити поведінку повітряного потоку, що обтікає біроторну вітроенергетичну установку (БВЕУ).

колесо було фіксованим, напрямком набігаючого на лопать повітряного потоку співпадав би з напрямком його швидкості v . Однак, через обертання вітроколеса, кожен елемент лопаті має власну колову швидкість, яка збільшується пропорційно відстані елемента від осі вітроколеса [27]. Напрямок цього руху збігається з площиною обертання вітроколеса (ωR). Ця сукупна швидкість, утворена з v та ωR , отримала назву "відносної швидкості". Для кожної частини лопаті ця швидкість має власний показник та набігає під різними кутами α [5].

Вітроустановки з вертикальною віссю обертання (ВВВ) найчастіше використовуються для ВЕУ, що оснащені великими, схожими на крила лопатями [8]. Лопаті вітрогенератора з вертикальною віссю, завдяки своєму дизайну, залишаються у робочому стані незалежно від напрямку вітру.

Геометричне заповнення вітрового колеса залежить від кількості лопатей. ВЕУ з великим геометричним заповненням вітроколеса генерують значний крутний момент навіть при слабкому вітрі, а пік потужності досягається на низьких обертах колеса [8, 10]. ВЕУ з невеликим заповненням досягають максимальної потужності на вищих обертах, і потребують більше часу для досягнення цього режиму. Перші установки добре працюють як водяні насоси, навіть за незначного вітру, зберігаючи свою функціональність; другі використовуються як електрогенератори, де важлива висока швидкість обертання.

Щодо розташування вітрового колеса, воно може бути встановлено попереду або позаду вежі [7, 8]. У реальному часі напрям вітру знає швидких змін, і вітроколесо має миттєво реагувати на ці зміни. У ВЕУ з потужністю понад 3 кВт для стабілізації застосовується сервопривід [7, 13].

Застосування різної кількості лопатей та їх профілів визначається функціональністю та цілями усієї системи. Однолопатеve вітроколесо характеризується високою швидкістю обертання та зазвичай викорис-

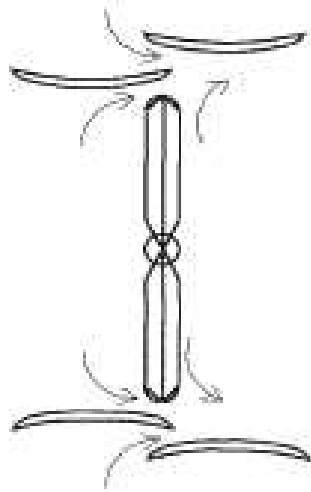


Рисунок 1.1 – Підсилювач потоку

Оцінка багатьох видів установок може бути зведена до визначення вартості електричної енергії, що виробляється цією установкою. Існуюча централізована мережа не може вирішити проблему електрозабезпечення автономного споживача. Звідси випливає необхідність розробки невеликого автономного вітроагрегата, який би задовольняв потреби цього споживача.

Аналіз класифікацій ВЕУ [12, 17] також продемонстрував, що для умов з низькою швидкістю повітряного потоку, а саме 1,8-6 м/с, та наявністю потенційного споживача потрібна розробка енергоефективної, транспортабельної установки, що має компактні габарити. Для досягнення поставленої мети було використано метод одночасного обертання роторів I та II, чим було досягнуто необхідної кутової швидкості для генерації електроенергії: . Раніше цей метод не застосовувався, оскільки ВЕУ розроблялися для місцевостей з більш високими швидкостями вітру. На основі методу зустрічного обертання було запатентовано ВЕУ з генератором для умов з низькою швидкістю вітру (патент №1787205). Запатентоване технічне рішення ВЕУ з біроторним генератором дає змогу доповнити класифікацію новим класом малогабаритних, малоенергоємних біроторних перетворюва-

різьбовий отвір для фіксації натяжної планки, котра слугує для регулювання натягу приводного ременя генератора.

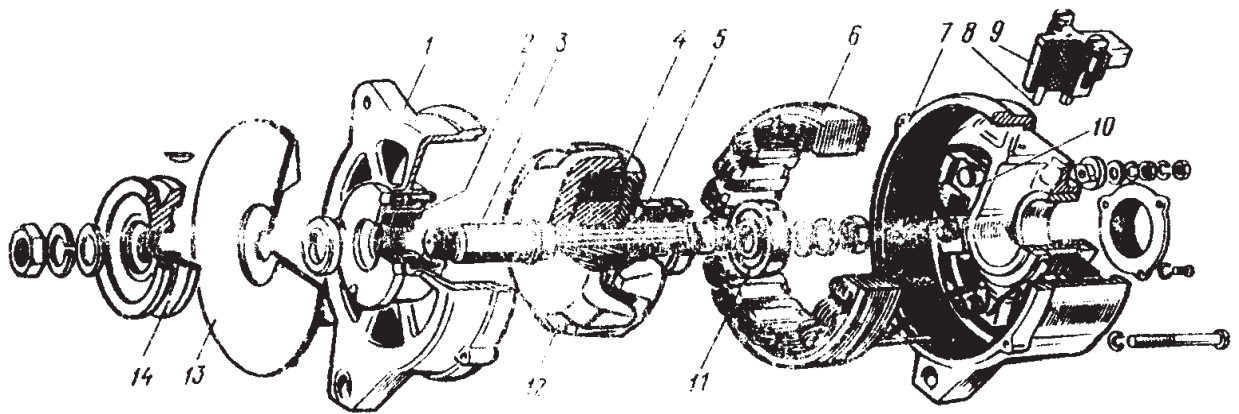


Рисунок 1.5 – Генератор змінного струму Г – 250

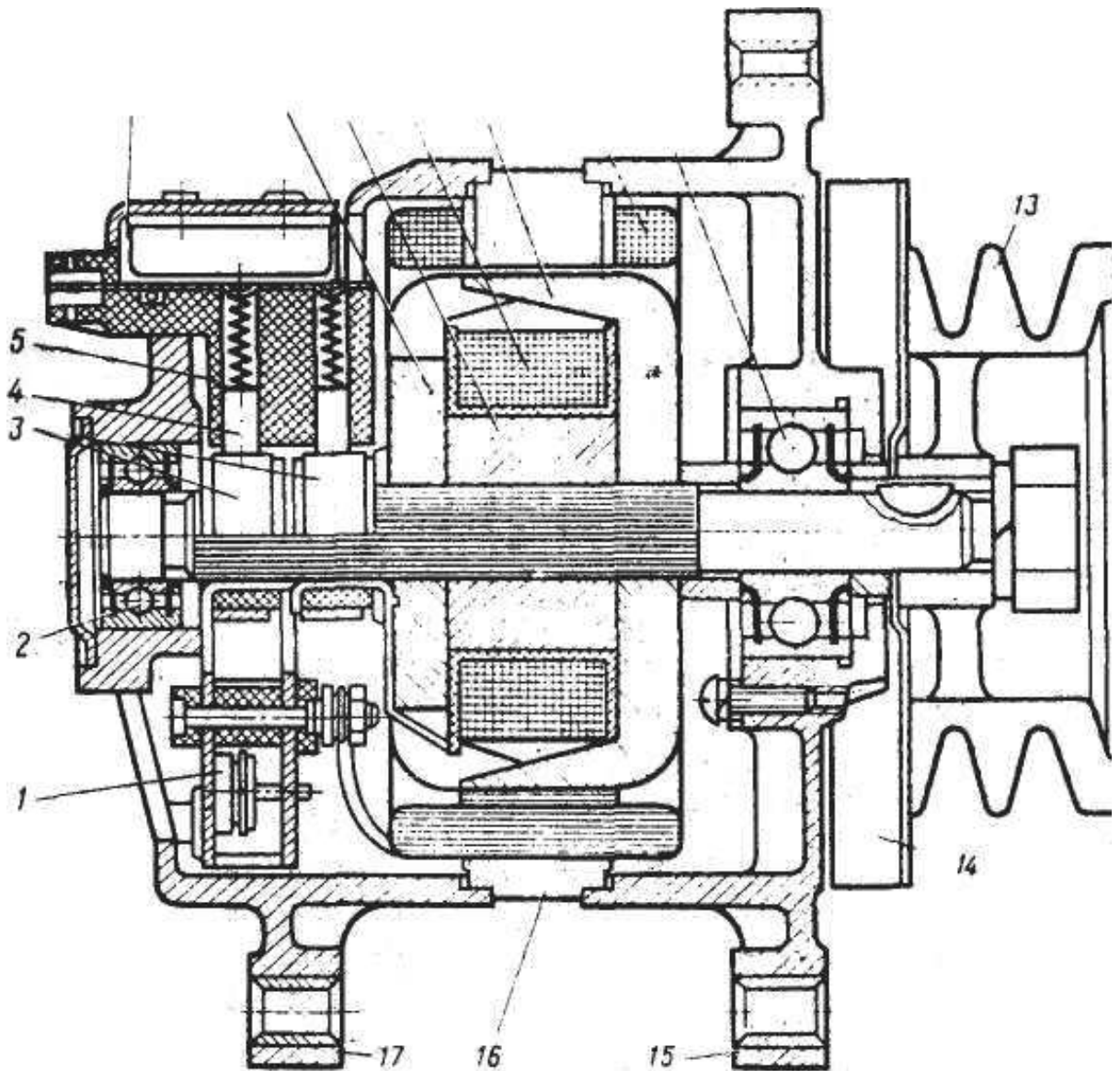
Задля мінімізації зношення посадкового місця для кулькового підшипника в задній кришці – 7, а також отвору в кронштейнах кришок, застосовуються сталеві втулки для армування.

У кришках встановлено кулькові підшипники – 2 і 11 з двобічним ущільненням та змащенням, яке розраховано на весь період роботи підшипника.

Зовнішній вентилятор – 13 (рисунок 1.5) та шків – 14 кріпляться на виступний кінець валу – 3 ротора. Крізь вентиляційні вікна, що розташовані в кришках, проходить повітря для охолодження. Напрямок руху повітря для охолодження - від кришки зі сторони контактних кілець до вентилятора.

Наступним кроком розвитку конструкції генератора типу Г – 250 є генератор 17.3701 (рисунок 1.6). Він характеризується вбудованим інтегральним регулятором напруги Я112А та випрямляючим блоком типу БПВ – 4 – 45. Інтегральний регулятор разом із щіткотримачем фіксується двома гвинтами М4 на алюмінієвому кожусі. Контактні майданчики регулятора приєднані до контактних шинок щіток, а його з'єднання з масою реалізується через захисний алюмінієвий кожух при затягуванні гвинтів М4. Випрямний блок кріпиться до зад-

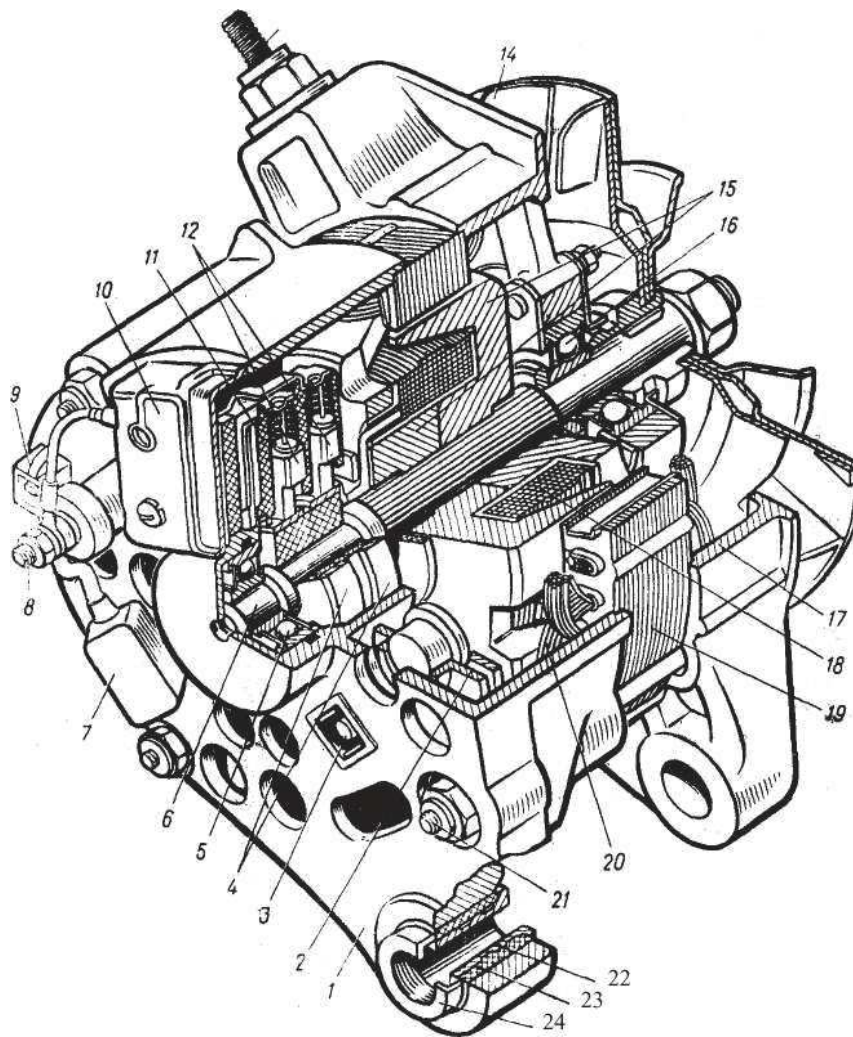
ньої частини кришки гвинтом М5, з'єднуючи його неізолюваний тепловідвід з масою, і ізолюваним гвинтом М5, який створює вивід „+”.



1 – випрямляч; 2, 12 – підшипники; 3 – кільця; 4 – щітки; 5 – щіткоутримувачі; 6 – регулятор напруги; 7, 10 – "клювообразні" полюсні половини ротора; 8 – втулка; 9 – обмотка збудження; 11 – обмотка статора; 13 – шків; 14 – вентилятор; 15, 17 – кришки; 16 – сердечник статора

Рисунок 1.6 – Генератор 17.3701

Притаманною рисою генератора Г222 є наявність шпильки з різьбою М10 · 1,25. Вона розташована на передній кришці і призначена для фіксації планки натягу ремня. Також використовується для закріплення гумових амортизаційних буферних втулок в отворах лап та фіксації розрізними гайками, в які вставлені пластмасові втулки.



1, 7 – кришки; 2 – випрямний блок; 3 – болт фіксації випрямного блоку; 4 – контактні кільця; 5, 16 – кулькопідшипники; 6 – вал; 7 – конденсатор; 8 – вивід „+” („30”); 9 – штекерний вивід нульової точки обмотки статора; 10 – регулятор напруги; 11 – щіткотримач; 12 – щітки; 13 – шпилька натяжного пристрою; 14 – шків – вентилятор; 15 – „дзьобоподібні” полюсні половини ротора; 18 – обмотка збудження; 19 – осердя статора; 20 – обмотка статора; 21 –

Суттєвий імпульс для еволюції генераторів з постійними магнітами дала поява передових енергосистем змінного струму з перетворювачами частоти та високовольтних (270 В) систем постійного струму, що використовують перетворювальні пристрої на основі силових напівпровідникових ключів високої напруги. За таких умов управління напругою реалізується перетворювачем, що дозволяє нівелювати ключовий недолік генераторів з постійними магнітами – складність регулювання напруги. Переваги генераторів з постійними магнітами полягають у їх високому коефіцієнті корисної дії, більшій надійності, незначних габаритах і масі, малій тривалості перехідних процесів, а також в удосконалених вихідних характеристиках порівняно з генераторами електромагнітного збудження. На сьогодні розроблені, вироблені та протестовані електричні машини з постійними магнітами з потужністю 60 та 150 кВ*А, які працюють у генераторному та двигунному (статорному) режимах (наприклад, компанія "Дженерал Електрик" – США).

Використання генераторів з постійними магнітами у системах живлення значно полегшує питання охолодження генераторної установки. Ротор, як правило, не вимагає спеціального охолодження, бо втрати у ньому невеликі. Наявність значного робочого проміжку між ротором і статором дає змогу легко ізолювати ротор від статора, що спрощує конструкцію системи охолодження статора.

Застосування магнітів на основі рідкісноземельних елементів в індукторах вентильних генераторів постійного струму сприяє значному зменшенню рівня пульсацій випрямленої напруги, порівнюючи з генераторами з електромагнітним збудженням. Використання магнітної системи з пазовим розміщенням магнітів на індукторі, винесення якірної обмотки у робочий зазор, а також використання суцільної мідної труби на індукторі як демпфера дозволило приблизно удвічі знизити пульсації випрямленої напруги [4].

В останні роки електричні генератори з постійними магнітами, обладнані високошвидкісними приводами, зазнали значного поширення. Вони знайшли застосування в автономних системах забезпечення енергією, на переносних установках, в транспортних засобах та на інших об'єктах. Потужність таких генераторів варіюється від 1 до 120 кВт·А.

Впровадження безконтактних генераторних установок для автомобілів та тракторів має велике народногосподарське значення. Розробка та впровадження в виробництво індукторних генераторів з комбінованим збудженням сприяє підвищенню надійності систем енергопостачання автомобілів і тракторів, а використання нових матеріалів та передових технологій дозволяє зменшити їхні габарити та вагу, а також знизити собівартість виробництва.

1.4 Аналіз існуючих технічних рішень

На цей момент часу декілька організацій, включаючи оборонні підприємства, взялися за створення вітроагрегатів з широким спектром потужностей [15, 16]. НВО «Вітрозн» випускало вітроустановки 12 різновидів, на основі яких було розроблено 20 моделей обладнання, що мають вузькоспеціалізоване або загальне призначення. До найбільш поширених вітроелектричних установок відносяться АВЕУ 6-4 м, АВЗ 12-16, АВЗ 18-30. Головні технічні показники установок подано в табл.1.2. Вітрогенератори здатні працювати за швидкості вітру від 5,0 до 40,0 м/с, при температурі навколишнього середовища від -40°C до +40°C.

Вітроустановки, виготовлені цим НВО, випускалися серійно, але під час експлуатації продемонстрували недостатню надійність через недоліки конструкції та технологій, а також низький рівень розвитку систем зберігання енергії та резервних систем [16].

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВКИ

2.1 Вітроенергетична установка для генерування електроенергії з підвищеним використанням енергії вітру

Перш ніж поринути в деталі певної вітроустановки, варто акцентувати на двох ключових моментах.

Перше, слід зазначити, що типова українська сім'я за місяць використовує від 100 до 300 кВт/год електроенергії, а середня щорічна швидкість вітру в Україні становить приблизно 4 м/с. Отже, для задоволення потреб у електроенергії для домогосподарств, оптимальним вибором буде саме ця вітроелектрична система [БРМА 25.00.00.000СК], яка генеруватиме близько 200 кВт електроенергії на місяць. Варто зауважити, що її ефективність зберігатиметься навіть у регіонах України з не дуже сприятливими умовами вітру.

Ця система енергозабезпечення включає:

- Гондолу з низькошвидкісним електрогенератором на постійних магнітах, випрямлячем, механічними гальмами, безредукторною трансмісією, поворотним механізмом та лопатями у вигляді рамок, на яких закріплений гнучкий вітриний матеріал (по одній лопаті з кожного боку поворотної головки);
- Трубчасту щоглу з фундаментом;
- Кислотну акумуляторну батарею;
- Важіль для управління (через ланцюгову передачу і зірочки) роботою вітроколеса;

Отже, ця вітроенергетична система безперебійного живлення створена для перетворення енергії вітру на електричну, її накопичення у акумуляторній батареї та перетворення на електроенергію стандартних параметрів, щоб забезпечувати нею: житлові будинки, малі фермерські господарства; турбази, санато-

2.2 Опис акумуляторної батареї

Для розв'язання поставленої задачі, тобто, накопичення електричної енергії, виробленої вітровою електростанцією, можна застосувати автомобільну акумуляторну батарею. Автомобільний акумулятор служить для живлення електричним струмом стартера при запуску двигуна, а також для усіх інших пристроїв електрообладнання, коли генератор не функціонує або ще не може передавати енергію в мережу (наприклад, під час роботи двигуна на холостому ході).

У випадку, коли споживана користувачами потужність перевищує потужність, яку виробляє генератор, акумуляторна батарея, розряджаючись, забезпечує живлення споживачів одночасно з функціонуючим генератором.

Свинцево-кислотна акумуляторна батарея — це вторинне хімічне джерело постійного струму. Щоб вона могла постачати електричну енергію, її спочатку необхідно зарядити, тобто передати їй певну кількість електричної енергії. У автомобілях застосовують типові акумуляторні батареї, конструкція яких передбачає їх розрядження струмами, що в 3 – 5 разів більші за їх номінальну ємність.

Стандартні акумуляторні батареї, що виготовляються нашою промисловістю, розподіляються за: номінальною напругою (6 і 12 В); за конструкцією: у моноблоці з кришками та перемичками над ними та у моноблоці із загальною кришкою з перемичками під нею; за типом обслуговування: залиті електролітом або сухозаряджені.

Свинцево-кислотний статорний акумулятор. Він складається з таких головних елементів: від'ємних пластин – 4 (рисунок 3.1), зібраних у напівблок – 7, додатних пластин – 3, згрупованих у напівблок – 8. Паралельно з'єднані пластини одного знаку (плюс або мінус), вивідних штирів – борнів 9, акумуляторного бака – 10 із спільною кришкою – 11 та заливними пробками – 12.

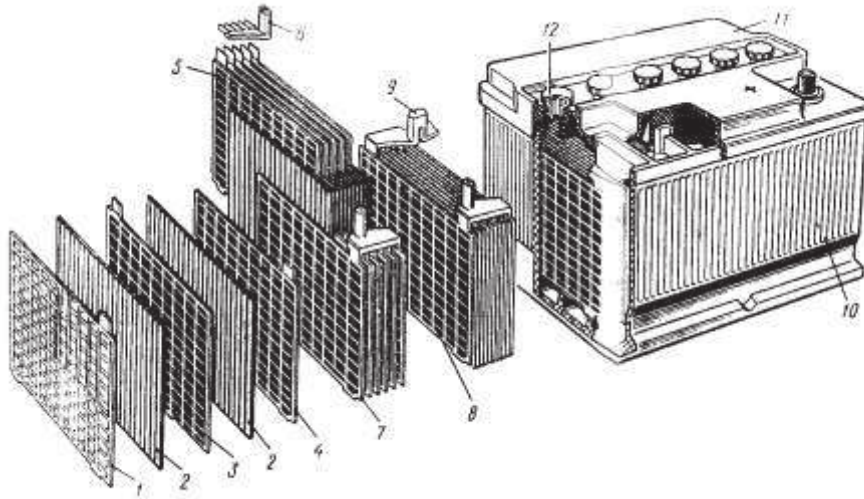


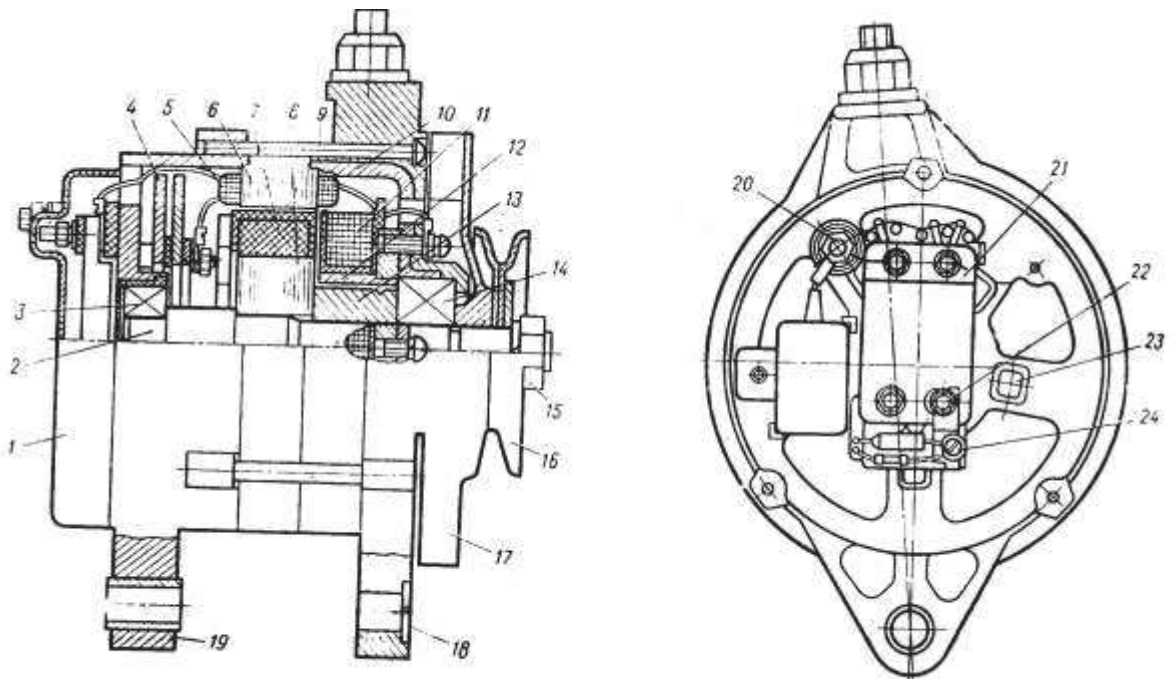
Рисунок 2.1 – Будова свинцево-кислотної акумуляторної батареї з загальною кришкою

Від’ємні й додатні пластини виготовляються з ґратки – 1, відлитої зі свинцево-сурм’янистого сплаву, де стибію вміщено від 4 до 5 %. Цей стибій збільшує опір ґратки до корозії, робить її міцнішою та покращує текучість сплаву під час лиття.

Ґратка виконує роль основи, на якій тримається активний матеріал пластини. Паралельно, ґратка гарантує рівномірне підведення та відведення струму до активного матеріалу в процесі заряджання або розряджання акумулятора. Активний матеріал виробляється у вигляді пасти та заповнює ґратку. Завдяки пористій структурі матеріал активна площа пластини стає більшою в 600 – 800 разів відносно її фізичної площі. Активним матеріалом від’ємних пластин є губчастий свинець Pb, котрий має сірий відтінок. Активним матеріалом додатних пластин є діоксид свинцю PbO₂ темно-коричневого кольору.

Аби уникнути зіткнення позитивних та негативних пластин, яке спричиняє коротке замикання, їх розмежовують прокладками, котрі називаються сепараторами. З боку, який обернений до позитивної пластини, сепаратор осна-

Після проведення аналізу генераторів сталого та змінного струму (дивись розділ 1.3) для вітрової електростанції було обрано індукторний безщітковий вентильний генератор 955.3701, зображений на рисунку 3.2.



1 – кожух; 2 – вал ротора; 3, 14 – кулькопідшипники; 4 – випрямляч; 5 – обмотки статора; 6 – осердя статора; 7 – вузол постійних магнітів; 8 – зірочка ротора; 9 – стяжні гвинти; 10 – передня кришка-магнітопровід; 11 – обмотка збудження; 12 – втулка індуктора; 15 – гайка кріплення шківів; 16 – шків; 17 – вентилятор; 18 – підшипниковий щит; 19 – задня кришка; 20 – вивід «+» («30»); 21 – пристрій регулювання напруги; 22 – гайки кріплення регулятора; 23 – болт кріплення випрямляча; 24 – перемикач посезонного регулювання

Рисунок 2.2 – Безщітковий генератор 955.701

Ротор генератора має шестипроменеву зірочку, вироблену зі сталі. В просторах між променями розташовані постійні магніти, з'єднані в цілісну конструкцію шляхом заливання в алюмінієву деталь, прикріплену до валу ротора, або обпресовані пластмасою. На зубцях статора розміщено котушкову обмотку, з'єднану в п'ятикутник. Передня кришка сталева. В ній міститься індуктор

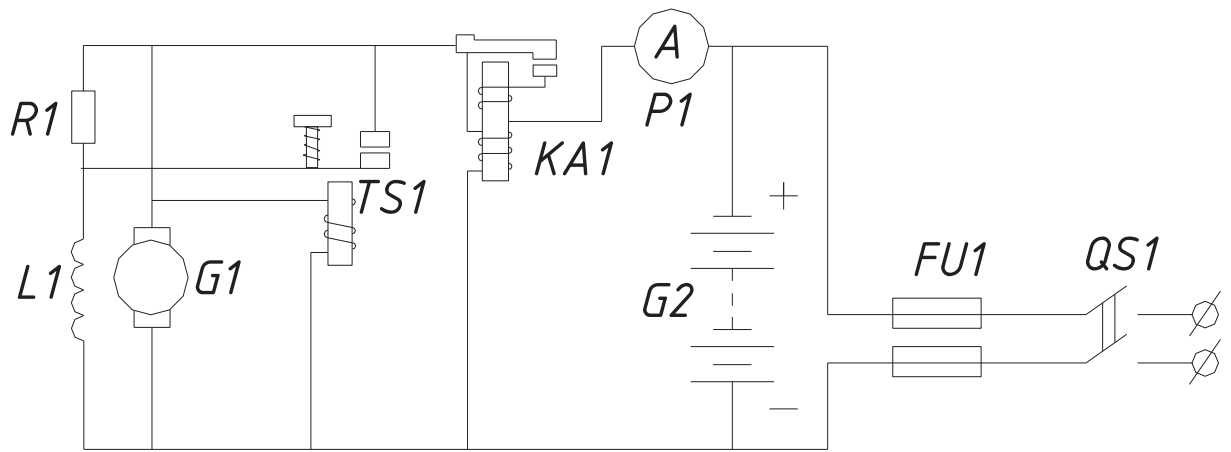


Рисунок 2.3 – Електрична схема вітроенергоустановки

Зменшення напруги генератора призведе до послаблення притягання якоря паралельної обмотки регулятора напруги. Внаслідок цього його контакти з'єднуються знову, що спричинить збільшення струму збудження.

2.5 Аналіз особливостей взаємодії вітропотoku у ВЕУ

Основним завданням аеродинамічних досліджень є встановлення силової взаємодії та теплообміну між рідким середовищем та обтічним тілом. Існують два підходи до кінематичного дослідження рідини [7].

Метод Лагранжа зосереджується на русі окремих часточок рідини, визначаючи для кожної з них траєкторію, тобто координати часточок як функцію часу [9, 10]. Метод Ейлера описує швидкості часточок як функцію часу t та координат x, y, z точок у просторі [8].

Від опису кінематики методом Ейлера можна переходити до представлення потоку методом Лагранжа. Обернена задача, яка передбачає перехід від методу Лагранжа до методу Ейлера, зводиться до диференціювання рівнянь за часом з подальшим виключенням постійних a, b, c [8].

Рівняння нерозривності руху в математичному вигляді виражає закон збереження маси [7] і має вигляд:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div} \bar{V} \right) = 0 \quad (2.1)$$

Повітряну модель можна розглядати загалом як мішанину з n складових. Описуючи її стан рівнянням стану для суміші ідеальних газів, що виражаються законами Дальтона [5]:

$$P = \rho \cdot R \cdot T = \frac{x}{\nu} \cdot T \cdot \frac{k}{m} \quad (2.2)$$

де $P = \sum_{i=1}^n \rho^{(i)}$; $R = \frac{k}{m}$ - газова стала суміші;

$$T = \frac{I}{\nu} \sum_{i=1}^n T^{(i)} \nu^{(i)} - \text{температура суміші } \nu^{(i)};$$

ν - число частинок в одиниці компонента та суміші;

ρ - густина компоненти.

Рівняння енергії, пліч-о-пліч з рівняннями стану, динаміки та нерозривності, становить фундамент базової системи диференціальних рівнянь, чиє розв'язання повністю описує перебіг руху газу.

Це рівняння [26] є відображенням закону збереження енергії, згідно з котрим зміна за часовий проміжок dt загальної енергії, складеної з кінетичної та внутрішньої енергії часточок, тотожна сумі робіт зовнішніх сил, що діють на часточку, і притоку тепла ззовні. Рівняння енергії, викладене в [8], постає рівнянням Бернуллі.

$$\rho \frac{V_1^2}{2g} + p_1 = \rho \frac{V_2^2}{2g} + p_2 = \text{const} \quad (2.3)$$

$$P_1 = C_p \cdot P_0. \quad (2.11)$$

Потужність, яку визначає вітровий потік, що проходить за певний час, через площу вітрового колеса, описується так:

Вираз для коефіцієнта можна обчислити з формули (2.11), якщо підставити у неї (2.10):

$$C_p = \frac{2\rho \cdot A_1 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_1)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot V_0^3} = \frac{4 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_1)}{V_0^3}. \quad (2.12)$$

Виразимо відносно гальмування потоку у вітроколесі через коефіцієнт гальмування α :

$$\alpha = \frac{V_0 - V_1}{V_0}. \quad (2.13)$$

Тоді

$$V_1 = (1 - \alpha) \cdot V_0. \quad (2.14)$$

Підставивши (2.13.) і (2.14.), отримуємо:

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha). \quad (2.15)$$

Аналізуючи енергетичну ефективність вітрової турбіни при варіаціях коефіцієнта гальмування (2.12), бачимо, що найбільше значення C_p досягається при $\alpha = 1/3$.

$$Cp_{\max} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (2.16)$$

Умова (2.16) відома як критерій Бетца та застосовується в розрахунках вітрових і гідравлічних вітроустановок.

Варто зауважити, що класична теорія не розглядає поведінку повітряного потоку після його проходження через перетин A_2 та не дозволяє встановити осьові координати перетинів A_0 та A_2 відносно A_1 , як і перетину за колесом, де тиск і швидкість збуреного потоку повертаються до початкових значень. У праці [8] підкреслюється, що ці характеристики можуть бути визначені лише експериментальним шляхом. Водночас дослідження картини взаємодії потоку з вітроколесом свідчить, що правильний вибір координати розташування другого колеса може мати велике значення для загальної потужності вітроенергетичної установки (ВЕУ). Розглянемо, які відомості можна отримати з класичної теорії стосовно розрахунків параметрів ВЕУ.

З аналізу традиційної теорії функціонування вітрогенератора випливає, що щільність енергії вітру є надзвичайно низькою. Відповідно до формули (2.10), розміри вітрових коліс визначають обсяг перетвореної потужності.

Це пояснює значну матеріаломісткість та вартість конструкцій. Тому першочергово важливими стають питання оптимізації конструювання вітроенергетичних установок та обґрунтованість вибору значення C_p .

Звернімося до фізичних засад застосування кінетичної енергії вітру. Варто зосередити увагу на тому, що коефіцієнт використання енергії вітру залежить не лише від аеродинамічної досконалості вітроколіс, але й більшою мірою від можливого відбору потужності, тобто від співвідношення питомої енергії незбуреного потоку перед вітроколесом до питомої енергії відпрацьованого потоку за колесом. Своєю чергою, C_p ВЕУ пропорційний

$$E = 0,0049\rho V^3 F \quad (3.5)$$

Залежність потужності Р повітряного потоку, яка припадає на 1 квадратний метр його площі поперечного перерізу, від швидкості повітряного потоку v при температурі +15°C та атмосферному тиску 101,325 кПа (відповідно до щільності повітря 1,25 кг/м³) наведена в таблиці 4.1.

Таблиця 3.1 – Залежність потужності повітряного потоку від швидкості його руху

v, м/с	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Р, кВт/м	0,039	0,132	0,312	0,61	1,054	1,674	2,5	3,6	4,9

Відносна зміна потужності повітряного потоку в залежності від відхилень температури та атмосферного тиску, що вимірюються від позначок +15°C та 101,325 кПа, в межах їхніх реальних значень, подана у таблиці 3.1.

Вітроенергетичні установки здатні конвертувати в корисну енергію лише частину енергії, яка припадає на площу вітроприймального пристрою. Індикатором цього процесу є коефіцієнт використання енергії вітру – функція швидкохідності вітроколеса. Для ідеального вітроколеса при $z = 5-6$ значення досягає максимуму, котрий дорівнює 0,593; експериментальні дані свідчать, що дволопатеve вітроколесо правильної аеродинамічної форми при $z = 5-6$ має $\epsilon = 0,47$. У практичних розрахунках ВЕУ коефіцієнт використання енергії вітру рекомендується приймати як такий, що дорівнює 0,4.

При переході від потужності потоку вітру до потужності ВЕУ, швидкість повітряного потоку слід замінити розрахунковою швидкістю - найменшим показником швидкості, за якого ВЕУ видає номінальну потужність. В.І. Єсьман та Н.А. Мамедзаде рекомендують визначати розрахункову швидкість як ту, що забезпечує найбільший річний виробіток електроенергії. Зважаючи на це, а та-

$$N = 0,0049 \rho V_p^3 F \xi \eta_p \eta_e, \quad (3.6)$$

де - η_p , η_e відповідно ККД редуктор та електрогенератор.

Площа поперечного перерізу повітряного потоку, який захоплює вітрове колесо, відповідає площі кола, окресленого лопатями під час їхнього обертання, безвідносно до їх кількості. Якщо виразити в (3.6) площу F через діаметр D (м) вітрового колеса, отримуємо:

$$N = 0,00386 \rho V_p^3 D \xi \eta_p \eta_e. \quad (3.7)$$

Результати розрахунку встановленої потужності ВЕУ залежно від швидкості вітру та діаметра вітроколеса при температурі +15 С, а атмосферному тиску 101,325 кПа, $\xi = 0,4$ та $\xi = 0,9$ наведено в таблиці 2.2.

При розрахунковій швидкості вітру в 1,5 раза вищій від середньорічної число годин використання встановленої потужності ВЕУ за рік становить 3500 – 4000, причому з максимальною потужністю установка працює близько 30 % загального часу, з потужністю не менш як половина встановленої – 45 % часу і не працює через малі швидкості вітру (енергетичний штиль) решту часу.

Корисну енергію ВЕУ починає віддавати при мінімальній швидкості вітру, що становить 30 – 40 % розрахункової. Ця швидкість вітру називається його мінімальною робочою швидкістю. Для самозапуску ВЕУ швидкість вітру повинна бути трохи більшою від цієї швидкості. При розрахунковій та більшій швидкості вітру ВЕУ працює з встановленою потужністю до деякої максимальної швидкості вітру, після досягнення якої вітроколесо зупиняється за умовами безпеки.

Формула (3.6) задає величину встановленої потужності ВЕС, враховуючи розрахункову швидкість вітру, але не бере до уваги інтервал її робочих швидкостей. Цей недолік відсутній у формулі, що запропонована у праці [4]. Вона

рекомендується для визначення питомої потужності ВЕС (потужності у ватах на 1 м площі, що описується вітроколесом) і має вигляд

$$N_0 = 0,5\xi\eta_p\eta_c\rho \left[\int_{v_0}^{\bar{v}_p} v^3 f(v) dv + v_p \int_{v_p}^{v_{\max}} f(v) dv \right], \quad (3.8)$$

Де v – швидкість вітру, м/с;

$f(v)$ – диференціальна функція розподілу тієї швидкості, проміле;

v - мінімальна робоча швидкість вітру,

v_p - швидкість вітру, що відповідає початку регулювання роботи установки, м/с;

v_{\max} – максимальна швидкість вітру, за якої установку виводять з-під потоку вітру, аби уникнути аварії.

Диференціальну функцію розподілу швидкості вітру для певних періодів року обчислюють за допомогою рівняння (3.2).

Повна встановлена потужність ВЕУ визначається виразом:

$$N = N_0 F. \quad (3.9)$$

З (3.9) та (3.7) стає очевидно, що величина потужності вітроенергетичної установки збільшується пропорційно до площі, яку охоплює ротор. Отже, прагнення забезпечити максимальну потужність устаткування за визначеної швидкості вітру спонукає до збільшення діаметра ротора, що веде до зниження питомої ціни ВЕУ. Сьогодні в деяких державах розробляються ВЕУ з діаметром ротора 100 м, а розмір 50 м розглядається як мінімальний для потужних системних вітроустановок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.:ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.
3. Забарний Г.М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г.М. Забарний, А. В. Щурчков// – К.: ІТТФ, 2002. □ С. 151 -159.
4. Б.П. Коробко Як вибрати вітряка //Винахідник і раціоналізатор, № 2,2000 р., с.26 -28.;
5. Проектуємо електрику разом. URL: <http://vgs-design-el.blogspot.com>
6. Дикий М.О. Поновлювані джерела енергії.: Підручник. – К.: Вища школа, 1993. – 351с.: іл.;
7. Журнал „ Винахідник і раціоналізатор”, № 1, 2000 р., с,4 -10.;
8. : Технічні науки". – Київ: ТНУ, 2018. – Том 29 №3/2018 (68). – С.61–65.
9. Куценко О. А. Розробка моделі вітрогенератора для індивідуального використання // Вісник технічного університету Поділля. — 2020. http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2020_3/7.pdf
- 10.Герасименко О. М., Білик О. Ю. Вітроустановка малої потужності для автономного електропостачання // Східноєвропейський журнал передових технологій. — 2021. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/221902>
- 11.Михайленко С. В. Вітрова енергетика в приватному секторі України: технічні та економічні аспекти // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, №2, 2019. <https://energy.kname.edu.ua/index.php/energy/article/view/67>
- 12.ДСТУ ISO 61400-2:2015 — Вітрові турбіни. Частина 2: Вимоги до малих вітрових турбін. <https://online.budstandart.com>

