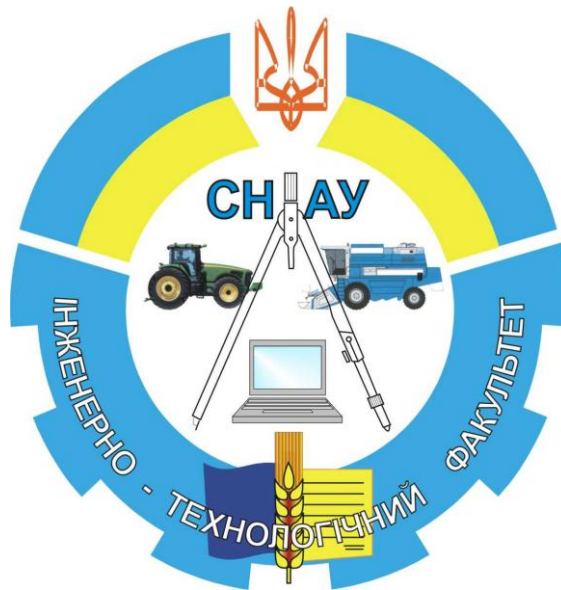


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



МОНТАЖ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Методичні вказівки до виконання лабораторного заняття

м. Суми - 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра Енергетики та електротехнічних систем

МОНТАЖ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Методичні вказівки до виконання лабораторного заняття

для студентів 1ст курсу спеціальності

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка ”

Освітній ступінь: **бакалавр**

м. Суми - 2022

УДК 620.9

Укладач: асистент кафедри «Енергетики та електротехнічних систем»
Юрченко О. Ю.

Монтаж електрообладнання і систем керування

Методичні вказівки до виконання лабораторних занять для студентів
1ст курсу спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка ”– Суми, 2022. - 29 с., табл. 5. - Бібл. 8 .

В методичних вказівках викладені додаткові матеріали для
самостійного опрацювання студентами із теоретичних засад моделювання
теплових та гідродинамічних процесів в теплоенергетичному обладнанні
сільськогосподарського виробництва.

Наведені приклади вирішення типових задач по темах і умови задач
для самостійного розв'язку.

Рецензенти: Зав. кафедри Експлуатації техніки СНАУ, к.т.н., доцент
Саржанов О.А.

Доцент кафедри Тракторів, сільськогосподарських машин
та транспортних технологій Соларьов О.О.

Відповідальний за випуск: Чепіжний А. В.

Рекомендовано до видання методичною радою
інженерно-технологічного факультету
(протокол № 6 від «25» травня 2022 р.)

ЛАБОРАТОРНЕ ЗАНЯТТЯ

Тема: Вивчення параметрів вітроенергоустановок

Мета: Засвоєння студентами взаємозв'язку основних конструктивних і енергетичних параметрів вітроенергетичних установок і методики їх розрахунку.

Час: 4 год.

1.1 Порядок виконання роботи

- представити викладачу виконане завдання для самопідготовки.

Умову завдання наведено у п. 1.2;

- проробити практичну частину;

- 1) Визначити максимальну потужність вітроколеса (ВК).
- 2) Розрахувати оптимальну швидкохідність для п-лопатевого вітроколеса.
- 3) Визначити оптимальну частоту обертання вітроколеса
- 4) Для заданої швидкості вітру розрахувати основні параметри вітроенергоустановки (ВЕУ) різної потужності: діаметр ВК, оптимальну швидкохідність, частоту обертання і лінійну швидкість кінців лопатей.
- 5) Для ВЕУ потужністю P визначити швидкість вітру, при якій кінці лопатей досягнуть швидкості звуку (330 м/с).
- 6) Виконати лабораторну частину роботи.
- 7) Заслуховування і обговорення студентських рефератів з розробки конструкцій і використання ВЕУ в АПК.

- виконати домашнє завдання.

1.2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент в обов'язковому порядку повинен виконати наступні завдання:

а) вивчити конспект лекцій;

б) опрацювати рекомендовану літературу;

в) занести у зошит для практичних робіт такі матеріали:

- 1) Що таке частота обертання і період обертання валу? Який зв'язок між цими параметрами?
- 2) Яка природна сутність виникнення вітру?
- 3) Що являє собою роза вітрів та як нею користуватись?
- 4) Як залежить швидкість вітру від відстані над поверхнею землі?

1.3 Практична частина

1.3.1 Теоретичні відомості

Вітер фактично є однією з форм сонячної енергії. Сонячні промені нерівномірно падають на поверхню Землі, при цьому певні ділянки ґрунту нагріваються більше за інші. Оскільки тепле повітря легше за холодне й прагне піднятися догори, то рух повітряних мас є результатом подібного нерівномірного нагріву. Біля 2% тепла, що надходить до поверхні Землі перетворюється на кінетичну енергію руху повітря. Людство, однак використовує дуже малу частину з цього об'єму. Згідно теоретичних досліджень вітродвигуни (ВД) не можуть використовувати більше 50% цієї енергії, а практично використовують близько 30 – 40% в залежності від якості конструкції, легкості крил та ін. Найбільша швидкість повітряних потоків спостерігається на значній висоті над поверхнею землі та над океанами, де їх використання ускладнено. Залишок енергії витрачається на завихрення потоку за крилами, тертя та інші витрати.

Фінікійці, використовували парусні суди для вивчення та освоєння земного шару. В старовинному Єгипті вздовж морського узбережжя встановлювались декілька вітроагегатів кожен з яких працював тільки при певному напрямку вітру. Вітрові млини використовувались в Персії в 200р до н.е. Млини цього типу (козлові) були розповсюджені на Близькому Востокі та перенесені до Європи внаслідок Хрестових походів. Козлові млини мали істотний недолік в тому, що за умови сильних бурь вони могли опрокинутись разом із станиною. В якості виходу було знайдено рішення (шатрові млини) згідно якому рухомим залишався тільки дах млину для орієнтації та встановлення згідно напрямку вітру, інші частини млину жорстко фіксувались. В 16ст в Європі будували водонасосні станції з використанням гідравлічних та вітряних млинів, а в Нідерландах чисельні вітрові млини відкачували воду з ділянок огорожених дамбами. Тільки в кінці 19в (1890р) в Данії було вперше впроваджене використання вітрового млина для виробництва енергії.

На початку 20 сторіччя на території Російської імперії існувало близько 200 000 вітрових млинів на яких перероблювалось до 95% борошна. На території колишнього СРСР перша ВЕУ була впроваджена в 1931р в Ялті. Початком розвитку вітроенергетики можна вважати енергетичну кризу початку 70 – х років 20ст. Україна імпортує близько 70% природного газу та 82% нафти, здебільшого з Росії яка періодично підвищує ціни на них. Сплати за енергоресурси займають до 50% імпорту України. Для енергопостачання сільських споживачів в Україні створюються газодизельні мініТЕЦ потужністю 25кВт, 50кВт. Розроблені та масово виробляються ВЕУ потужністю 15 кВт. Саме такі ВЕУ рекомендуються з точки зору економічної ефективності для забезпечення енергопостачання сільських і фермерських господарств.

За даними на 2015рік потужність всіх світових вітроустановок складає

369 ГВт. Згідно відкритих джерел станом на 2014р в загальному енергобалансі Данії доля енергії вітру складає 39% (планується 50%); Португалії – 24% (планується 30%); Іспанія 17%; Ірландія – 16%. До 2013р Україна за розвитком вітроенергетики в світі посідала 37 місце.

За даними Міжгалузевого НТЦ вітроенергетики НАНУ територія України має значний вітроенергетичний потенціал. Спеціалісти вважають, що при максимальному використанні сили вітру можна отримати електроенергію в об'ємах, що задовольняють не менше 50% загального енергоспоживання країни, оскільки тривалість роботи ВГ в різних природньо – кліматичних зонах України в різні місяці складає від 65 до 80% днів.

Слід відзначити певну закономірність в можливості використання вітру на території України. В січні, наприклад, максимум часу можливого використання енергії вітру спостерігається в приморській зоні, південному Степу та Донбасі де тривалість роботи ВГ може досягати та перевищувати 24 дні, тобто майже 600 год на місяць. Ці райони, а також горні райони Карпат і Криму характеризуються більш високими порівняно з іншими районами України середніми швидкостями вітру. Найменша вітрова ефективність спостерігається по лінії середньої течії Дніпра та північно – західній частині України. Згідно Енергетичної стратегії України к 2030 року сумарна потужність ВЕС повинна перевищити 4 ГВт, що у відносному виразі складе 12% від сумарного виробництва енергії в країні.

В теперішній час в Україні працюють Донузловська, Судакська, Прісноводненська, Мирнівська, Тарханкутська, Очаківська, Новоазовська, Трускавецька, Казантипська, Старосамбірська, Ботієвська, Бердянська ВЕС, потужність яких невпинно зростає. Наприклад, комплекс Приазовський майже вийшов за даними на 2014 р на проектну потужність 550МВт, а у термін до 2018р планується запуск вітропарку Мангуш загальною потужністю 650 МВт. Таким чином на 2018 р сумарна потужність ВЕС України може сягнути 1,5-1,8ГВт.

Вітроенергетика являє собою галузь енергетичного сектору, що спеціалізується на перетворенні кінетичної енергії повітряних мас в електричну, механічну, теплову енергію для подальшого використання в народному господарстві. Враховуючи технологічні особливості вітрових електростанцій необхідно відзначити доцільність та оптимальність їх використання для забезпечення децентралізації енергопостачання, тобто для електрифікації сільськогосподарських ферм, польових станів, міні – виробництва з переробки продукції на місці вирощування. Децентралізація енергопостачання наочно видна з факту, що витрати на будівництво 1 км ЛЕП складають близько 1000\$. Крім того, при будівництві ЛЕП вирубаються лісові насадження, порушується екологічна безпечність регіонів та створюється шкідливе для здоров'я людини електромагнітне поле, втрати енергії при передаванні традиційним способом складають до 30%.

Деякі дослідники рекомендують та вважають економічно доцільним отримання за допомогою вітрогенератору не енергії промислової якості а постійного або змінного струму з перетворенням його за допомогою ТЕНів

на тепло для обігріву житла та отримання гарячої води.

Відомо, що вітроколесо (ВК) розвиває максимальну потужність P , Вт, визначувану за формулою

$$P = C_{\delta} A \rho \frac{U_o^3}{2} \quad (1)$$

Для пропелерної ВЕУ з діаметром вітроколеса D потужність буде дорівнювати

$$P = C_{\delta} \pi D^2 \rho \frac{U_o^3}{8}, \quad (2)$$

де C_{δ} - коефіцієнт потужності, максимальне значення $16/27 \approx 0,59$

ρ - густина повітря кг/м^3 ($\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$);

U_o - швидкість вітру, м/с ;

$A = \pi D^2 / 4$ - площа вітроколеса, м^2 .

Практично в швидкохідних добре спроектованих ВЕУ C_{δ} досягає 0,4.

Швидкохідність є головним параметром, що визначає характеристики ВГ та визначається як відношення лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості вітрового потоку. Згідно критерію Бетца ККД ідеального колеса складає 0,59. В дійсності ККД використання енергії вітру складає для турбін з горизонтальною віссю обертання ротору складає максимум 0,45 – 0,48, для турбін з вертикальною віссю обертання ротору близько 0,36 – 0,38. З виразу видно, що потужність P пропорційна ометаємій площі A і кубу швидкості. Коефіцієнт потужності залежить від конструкції вітроколеса і швидкості вітру. Оскільки швидкість вітру непостійна, а потужність дуже сильно залежить від швидкості, то вибір оптимальної конструкції вітроколеса багато в чому визначається вимогами споживача енергії. Зазвичай середньорічна потужність, що знімається з одиниці площі вітроколеса, пропорційна щільності повітря і кубу середньої швидкості. Максимальна проектна потужність вітроенергетичної установки (ВЕУ) визначається для деякої стандартної швидкості вітру. Зазвичай ця швидкість рівна приблизно 12 м/с , що при цьому з 1 м^2 ометаємій площі знімається потужність — порядку 300 Вт при значенні C_{δ} від 0,3 до 0,45. У районах із сприятливими вітровими умовами середньорічне виробництво електроенергії складає 22 – 30% його максимального проектного значення. Потужність вітродвигуна пропорційна до квадрату діаметру ВК, кубу швидкості вітру та суттєво залежить від коефіцієнту швидкохідності, який залежить від конструкції ВК та швидкості вітру. Термін служби ВГ зазвичай не менше 15 – 20 років, а їх вартість вагається від 1000 до 1500 дол. США за 1 кВт проектної потужності.

З конструктивних характеристик на потужність вітроколеса оказує вплив його діаметр, а також форма та профіль лопатей ротору та слабкий вплив має кількість лопатей. Частота обертання ВК пропорційна до швидкохідності та швидкості вітру та зворотно пропорційна до діаметру лопатей. На величину потужності також оказує вплив висота розташування

центру колеса, оскільки швидкість вітру з висотою змінюється. Ротор вітротурбини захоплює енергію потоку вітру, що проходить біля нього, тобто чим більше площа ротору тим більше енергії він може виробляти. Так, площа ротору збільшується пропорційно до квадрату діаметру ротору, ВГ вдвічі більших розмірів може виробляти в 4 рази більше енергії. Однак процес збільшення площі ротору неможливо зводити лише до збільшення лопатей ВГ. При збільшенні розмірів площі, що охоплює лопаті ВГ при роботі зростає навантаження на систему в цілому за тієї же швидкості вітру. Для надійної роботи необхідно зробити всі компоненти більш міцними, що призводить до збільшення коштовності конструкції.

Одна з основних умов при проектуванні вітрових установок — забезпечення їх захисту від руйнування дуже сильними випадковими поривами вітру. Вітрові навантаження пропорційні квадрату швидкості вітру, а раз в 50 років бувають вітри з швидкістю, що перевищує в 5 – 10 разів середню, тому установки доводиться проектувати з дуже великим запасом міцності. Крім того, швидкість вітру дуже вагається в часі, що може привести до втомних руйнувань, а для лопатей до того ж істотні змінні гравітаційні навантаження (порядка 10^7 циклів за 20 років експлуатації).

Оскільки вітру притаманна мінливість вирівнювання та стабілізація вихідної напруги, що виробляється агрегатом в умовах постійної зміни швидкості вітру здійснюється за допомогою акумулюючих пристроїв. Щоб знизити залежність від непостійності напрямку та сили вітру до системи включаються маховики, які частково сгладжують пориви вітру а також різного типу акумулятори. Наприклад застосовують повітряні (повітря нагнітається ВГ до балону виходячи звідки його рівний струмінь обертає турбіну з електрогенератором), гідравлічні (силою вітру вода підіймається на певну висоту, падаючи звідки вона обертає турбіну генератору). Можуть також застосовуватись електролізні акумулятори в яких вітродвигун виробляє електричний струм при розкладанні води на водень та кисень. Їх запасують в балонах та у міру необхідності спалюють в паливних елементах або в газовій турбіні, отримуючи струм, але без різких перепадів напруги. Внаслідок цього енергію вітру краще акумулювати в самому продукті, який вона виробляє – помеленому борошні, подрібнених кормах, воді, яка наповнила водонапірну башту. Недоліки ВЕУ такі як нестабільний виробіток енергії, що створює певні труднощі при роботі у мережі та необхідність використання акумуляторів частково компенсуються їх перевагами, а саме відсутністю паливних складових, невичерпність первинних джерел, низька вартість енергії, можливістю повної автоматизації, енергозабезпечення віддалених районів, модульним принципом будівництва ВЕУ.

Швидкість вітрів збільшується з висотою, а їх горизонтальна складова значно більше вертикальної. Остання обставина є основною причиною виникнення різких поривів вітру і деяких інших дрібномасштабних ефектів. Сумарна кінетична енергія вітрів оцінюється величиною порядку $0,7 \cdot 10^{21}$ Дж. Унаслідок тертя, в основному в атмосфері, а також при контакті із землею і водною поверхнями ця енергія безперервно розсіюється, при цьому

розсіювана потужність — порядку $1,2 \cdot 10^{15}$ Вт, що дорівнює приблизно 1% поглиненої енергії сонячного випромінювання.

Використання енергії вітру пов'язано з певними труднощами обумовленими непостійністю швидкості вітру та його напрямку а також низькою концентрацією повітряного потоку на одиницю площі поверхні Землі. Повітряні потоки біля поверхні Землі мають ламінарний характер течії при якому розташовані нижче шари повітря гальмують ті, що розташовані вище. Цей ефект помітний до висоти 1 км, але різко знижується від висоти 100 м. Висота розташування ВГ вище цього граничного шару дозволяє збільшити діаметр лопатей та звільняє місце для іншої діяльності. Мінімальна відстань між вітрогенераторами в єдиній енергетичній системі повинна бути не менше їхньої потрійної висоти. Густина атмосферного повітря в 800 разів менше за густину води, тому діаметр лопатей робочого колеса вітродвигуна має бути якомога більшим. Але збільшувати діаметр вітроколеса можливо лише до певних раціональних значень обумовлених зручністю та низькою вартістю обслуговування та параметрами статичної стійкості системи.

Швидкість вітру в значному ступені уповільнюється впливом лісів та великих міст; в той час коли великі водні простори або території аеропортів не оказують уповільнюючого впливу на швидкість вітру. Будинки, ліси та інші перешкоди не тільки уповільнюють швидкість вітру, але й створюють шкідливі турбулентні потоки. Будь який виступ на гладкій поверхні змінює характер течії потоку повітря, створюючи зони з підвищеною та зниженою швидкістю руху, та, відповідно з різною потенційно здобуваною енергією вітру (гори, будинки, штучні спорудження). В більш низьких шарах атмосфери на швидкість вітру істотний вплив оказує тертя з поверхнею Землі.

Одним з головних бар'єрів, що заважають розвитку вітроенергетичного сектору є розходження позицій ЄС та України є так звана «місцева складова», яка передбачена Законом України та за якою до інвесторів має застосовуватись «зелений тариф» за умови, що з 1 січня 2012р питома вага сировини, матеріалів, робітників, послуг українського походження мали складати не менше 15%; з 1 січня 2013р – 30%; а з 1 січня 2014р – 50% від загального об'єму інвестицій.

При прийнятті рішення щодо встановлення на приватній території ВГ можуть з'явитись питання адміністративного порядку. В цьому випадку корисно знати наступне:

- законодавча база України з енергоресурсів не передбачає сертифікації для вітчизняних ВГ та не передбачає іноземні сертифікати, тому його встановлення не потребує спеціальних дозвільних документів;
- використання побутового (до 75 кВт) ВГ прирівнюється до використання дизель – генератору або сонячних батарей, тобто прирівнюється до побутових електроприборів;
- якщо висота мачи ВГ не перевищує 30 м, а потужність 75 кВт для встановлення такого ВГ не потрібні будь які довідки, дозволи, експертні

висновки;

- ВГ побутового класу не генерує електромагнітне поле, що здатне здійснити шкідливий вплив на здоров'я людини. Для промислових вітрогенераторів існують обмеження по місцю їхнього розташування.

Класифікація ВЕУ:

- за положенням вітрогенератору відносно напрямку дії повітря (з горизонтальною віссю обертання паралельною до напрямку вітрового потоку; з горизонтальною віссю обертання перпендикулярною до напрямку вітрового потоку (подібні до водного колеса) та з вертикальною віссю (рисунок 1);

- за геометрією вітроколеса (ВК) роторні, карусельні, лопатеві, пропелерні;

- за потужністю ВЕУ малої потужності (до 100кВт); середньої потужності (від 100 до 500кВт); великої потужності (від 0,5МВт до 4МВт та більше;

- за призначенням водопідйомні, борошномельні, енергетичні, теплові;

- за розташуванням лінійні (мобільні) та циклічні (стаціонарні).

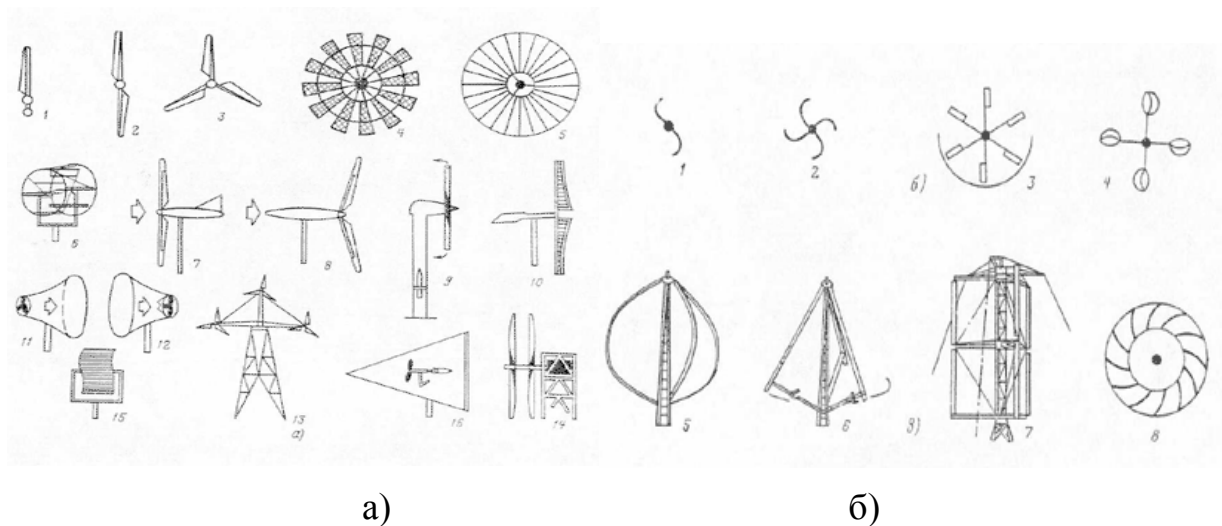


Рисунок 1 – а) конструкції вітрогенераторів з горизонтальною віссю обертання ротору; б) конструкції вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання ротору

Використання конструкцій заснованих на дії перпендикулярного напрямку вітру на установки з горизонтальною віссю обертання ротору виявилось низькоефективним, оскільки потребує використання систем орієнтації за напрямком вітру та складних методів зняття потужності, що веде до зниження їхньої ефективності. Вони не мають переваг порівняно з іншими типами вітродвигунів з горизонтальною та вертикальною віссю обертання ротору.

Вітродвигуни поділяються на основні типи :

- вітродвигуни з горизонтальною віссю обертання (крильчасті, пропелерні) (рисунок 2);

- вітродвигуни з вертикальною віссю обертання (карусельні та ортогональні);
- вихрові вітроенергетичні установки;
- вітроустановки баштового типу.

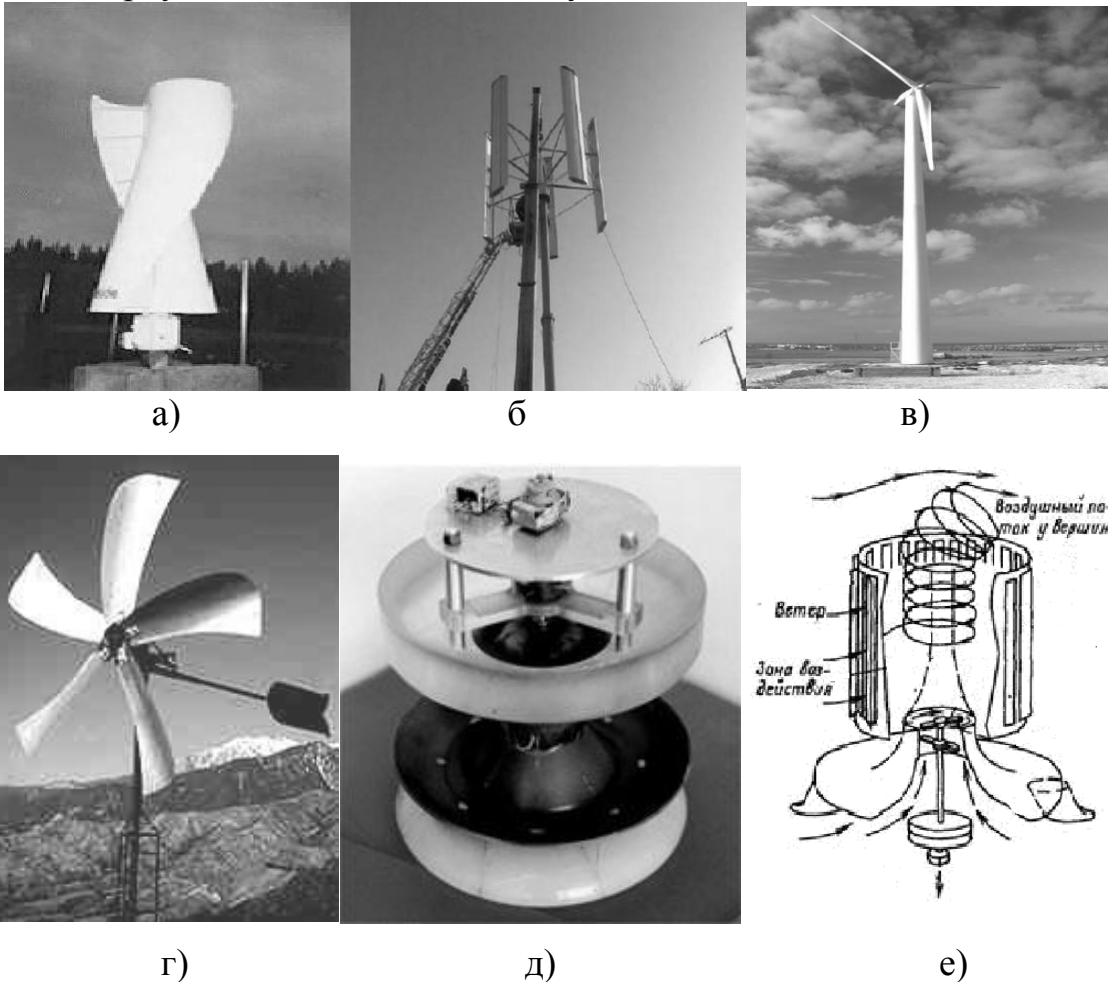


Рисунок 2 – а)карусельний лопатевий ВД; б)карусельний ортогональний ВД; в,г) крильчастий ВД; д) вихровий ВД; е)баштового типу «Торнадо»

Різні типи крильчастих двигунів відрізняються тільки кількістю лопатей. Для крильчастих та пропелерних ВД найбільша ефективність яких досягається при дії потоку повітря перпендикулярно до площини обертання лопатей крил, потрібен пристрій автоматичного повороту вісі обертання. З цією метою застосовують крило – стабілізатор. Карусельні ВД мають перевагу, що працюють при будь якому напрямку вітру не змінюючи власного положення. Відмінність в аеродинаміці дає конструкціям карусельного типу перевагу порівняно з традиційними установками. При збільшенні швидкості вітру вони швидко нарощують силу тяги, після чого швидкість обертання стабілізується. Коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ) у крильчастих ВД набагато вище, ніж у карусельних. В той же час до переваг карусельного типу відносять набагато більший момент обертання. Розповсюдження крильчастих ВА пояснюється величиною швидкості їх

обертання. Вони можуть безпосередньо з'єднуватись з генератором електричного струму без мультіплікатору. Швидкість обертання крильчастих ВД є зворотно пропорційною до кількості крил, тому агрегати з кількістю лопастей більше трьох практично не використовуються.

Карусельні ВД є тихохідними, що дозволяє використовувати прості електричні схеми, наприклад, з асинхронним двигуном, без ризику аварії при випадковому пориві вітру. Ще більш важливою перевагою конструкції карусельного типу є її здатність без додаткового обладнання стежити за напрямом вітру. ВД подібного типу використовуються в США, Японії, Великобританії, Канаді, Німеччині. Конструкція карусельного ВД забезпечує максимальний момент при запуску двигуна та автоматичну саморегуляцію максимальної швидкості обертання в процесі роботи.

Ортогональні ВА за оцінками спеціалістів є перспективними для промислового застосування. На теперішній час перед прихильниками ортогональних конструкцій є певні труднощі, зокрема проблема їх запуску.

Для оцінки ефективності застосування різних типів конструкцій ВД використовують відношення ККД колеса η до співвідношення $\omega R/b$, тобто відношення швидкості U_v , кінців лопатей ВК до швидкості вітру U_i (рисунк 3).

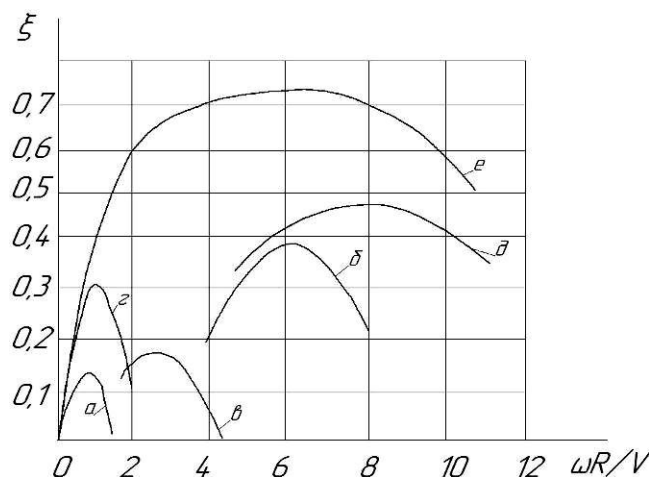


Рисунок 3 – Коефіцієнти корисної дії: а,б) карусельних вітрогенераторів; в – д) крильчастих вітрогенераторів; е) вихрового вітрогенератора.

Загальні недоліки ВЕУ

- Необхідність спорудження акумуляторів енергії враховуючи нерівномірність дії вітрового потоку, що підвищує кошовність установки на 25%;
- Високі витрати на інвертори (до 50% кошовності всієї установки) які застосовуються для перетворення постійного струму, який накопичується в акумуляторі, синхронізації його до промислового рівня за частотою та по фазі в змінний, який використовує більшість побутових електроприборів;
- Необхідність тривалої бесперебійної роботи для чого застосовується дизель – генератор та збільшує вартість конструкції;

- Необхідність використання контролера, що керує такими процесами як повертання лопатей, зарядження акумуляторів, перетворення змінного струму, що виробляється генератором в постійний для зарядки акумуляторних батарей.

Вітроколесо з горизонтальною віссю

Вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання можуть використовуватись для перетворення енергії вітру в підйомну силу або силу опору. Пристрої, що використовують підйомну силу є більш пріоритетними, оскільки вони можуть розвивати в декілька разів більшу силу, ніж пристрої з безпосередньою дією сили опору. Останні, крім того, не можуть працювати зі швидкістю яка перевищує швидкість вітру. Внаслідок цього лопасті, на які діє підйомна сила ВК можуть бути більш швидкохідними (швидкохідність – відношення окружної швидкості елемента вітроколеса до швидкості вітру) та мати краще співвідношення потужності та ваги при забезпеченні меншої вартості встановленої потужності. Вважається, що момент запуску горизонтально – осьових установок не дорівнює нулю, тому для їхнього запуску не потрібно зовнішнього джерела енергії. Однак, на практиці, ВК цього типу приводиться до дії самостійно лише в тому випадку, якщо воно з певною точністю направлено за напрямом вітру. При бічному вітрі потужне вітроколесо може не запуститись само по собі, що потребує зовнішнього джерела енергії для розгортання гондоли з вітроколесом на вітер.

Аналогічна ситуація може виникнути при короточасному зтиханні вітру або при уповільненні обертання валу внаслідок зростання навантаження – співвідношення швидкостей лопасті та повітря стає далеким від оптимального, відбувається зрив потоку з лопаті, КВЕВ падає в рази, отже, колесо навіть якщо не зупиниться то буде працювати в неефективному режимі. В цьому випадку необхідно знімати навантаження з валу, щоб дати колесу набрати швидкість та повернутися до робочого режиму.

Обертовий момент ВК створюється підйомною силою, що створюється при обтіканні профілю кожної з лопатей повітряним потоком. Внаслідок кінетична енергія повітряного потоку в межах зони, що омитається лопатями перетворюється в механічну енергію обертання вітроколеса. Відносно вітру вітроколесо в робочому положенні може розташовуватися перед опорною баштою або за нею. При передньому розташуванні вітроколесо повинне мати аеродинамічний стабілізатор або який-небудь інший пристрій, що утримує його в робочому положенні. При задньому розташуванні башта частково затінює вітроколесо і турбулізує потік, що набігає на нього. Вітрогенератори починають виробляти струм при швидкості вітру 5м/с та вимикаються при швидкості 25м/с. При роботі колеса в таких умовах виникають циклічні навантаження, підвищений шум і флуктуації вихідних параметрів вітроустановки.

Найбільш ефективними часто вважають швидкохідні горизонтальні двигуни з невеликою кількістю вузьких лопатей близьких за профілем до

профілю лопатей літакового пропелеру. Однак, їх ефективність повною мірою виявляється за високих швидкостей повітряного потоку від 10 до 15 м/с та вище. Завдяки відносно невеликій площі лопатей вони не є надто чутливими до сильних поривів вітру, однак, за тієї же причини вони в принципі не можуть зібрати всю енергію вітру, що проходить крізь площу, яка омитається лопатями – частки повітря попадають у великі відстані між лопатями, не взаємодіють з ними та їх енергія не використовується безпосередньо. Найбільш ефективними за співвідношенням ціна/продуктивність вважають трилопатеві колеса, однак, дволопатеві поступаються їм не дуже сильно. У кращих конструкцій промислового виготовлення КВЕВ може досягати 25..30%.

Найбільш розповсюдженими конструкціями ВЕУ є трилопатеві ВГ з горизонтальною віссю обертання (рисунок 4), що дають суттєвий економічний ефект при їх застосуванні в прибережних районах інвестиції в які в 1,5 – 2рази перевищує інвестиції в інші райони. Максимальна середня швидкість вітрів в цих районах приходить на осінньо – зимовий період, тобто в час найбільшої потреби в теплі. Для територій континентального типу з меншою швидкістю вітру застосовують ВГ з вертикальною віссю обертання роторного або карусельного типу. Головною перевагою вітроустановки з горизонтальною віссю обертання ВК є те, що умови обтікання повітряним потоком постійні, незмінні при повороті ВК а визначаються тільки швидкістю вітру.



а) б)
Рисунок 4 – Загальний вигляд вітроустановок з горизонтальною віссю обертання ротору а) швидкохідний ВГ; б) тихохідний ВГ.

Орієнтація вітроколеса на вітер здійснюється в агрегатах малої потужності за допомогою хвоста; в агрегатах невеликої та середньої потужності механізмом віндроз а в сучасних установках спеціальною системою орієнтації на вітер встановленою на гондолі ВЕУ. Механізм віндроз являє собою два або декілька невеликих вітроколеса, площина обертання яких перпендикулярна до площини обертання робочого ВК, що повертає платформу головки вітродвигуна до тих пір поки віндрози не будуть лежати в площині паралельній напрямку вітру. Вітроколеса з горизонтальною віссю обертання відносять до пропеллерного типу у яких

головною обертовою силою є підйомна сила. Напрямок вітру може змінюватись доволі швидко та ВК повинно чітко відстежувати ці зміни. Тому в ВЕУ потужністю вище 50кВт для цього використовуються електричні серводвигуни.

Вплив ВГ з горизонтальною віссю обертання на клімат виявляється в скороченні викидів CO_2 , SO_2 та закису азоту. Однак відбір енергії у вітру може сприяти зміні вологості в зоні експлуатації ВГ, призведе до зниження швидкості вітру та можливо зробить клімат більш континентальним.

До недоліків, що супроводжують використання ВГ можна умовно віднести шум, що вони утворюють. Шум утворюється при роботі механічних та електричних компонентів ВГ та його рівень складає на відстані в 350 м 30 – 40ДБ, що може бути порівняно із звичайним шумовим фоном села. Однак окрім шуму при роботі вітрогенераторів генеруються інфразвукові коливання з частотою нижче 16 Гц не відчутні слуховим апаратом людини але негативно впливаючи на них, створюючи наприклад відчуття тривоги.

Вплив льоду на лопаті та частини генератору, що здатне збільшити вагу лопатей та знизити ефективність роботи ВГ. Рідини, що використовуються в генераторі не повинні замерзати. Існує вирогідність зледеніння обладнання, що вимірює швидкість вітру. В цьому випадку ефективність вітрогенератору може суттєво знизитись. Враховуючи вплив льоду прилади можуть показувати низьку швидкість вітру, автоматика не буде спрацьовувати та ротор залишиться нерухомим.

Вітроелектрогенератори з вертикальною віссю

Сьогодні в парку вітроустановок, що експлуатуються в світі горизонтально – осьові (пропелерні) конструкції складають більше за 90%. Запізнення в освоєнні ВГ вертикально – осьового типу було викликано низкою причин:

- вертикально – осьові ВЕУ були винайдені значно пізніше за горизонтально – осьові (ротор Савоніуса – в 1929р, ротор Дар'є – в 1931 г, ротор Масгрува – в 1975 г.);

- до недавнього часу головним недоліком вертикально – осьових конструкцій помилково вважалось, що для них неможливо отримати співвідношення максимальної лінійної швидкості лопастей до швидкості вітру більше одиниці (для горизонтально – осьових ВЕУ це відношення складає більше 5:1).

ВЕУ з вертикальною віссю обертання практично безшумні, не потребують трудомісткого та складного обслуговування та мають термін експлуатації до 20років. Однак ці конструкції не можуть використовувати потенціал вітрів більшої швидкості, що знаходяться на висоті та схильні до руйнування порівняно з конструкціями з горизонтальною віссю обертання валу ВГ. Вертикальний ВГ не має будь – яких обмежень на встановлення поблизу житлових споруджень, оскільки шумове навантаження залишається в межах до 20 ДБ та не має магнітного випромінювання. Даний тип

вітрогенераторів є безпечним для птиць, бджіл та навколишнього середовища та потребує мінімальної площі для встановлення. Конструкціям з вертикальною віссю обертання для початку виробітку електроенергії достатньо швидкості вітру 1м/с; для ВЕУ з горизонтальною віссю швидкість вітру повинна сягати близько 5м/с. Однак більшість конструкцій роторів з вертикальною віссю обертання повинні передбачати механізми початкового розкручування, що дещо ускладнює конструкцію та робить її більш кошовною.

ВЕУ з вертикальною віссю обертання (коли вісь обертання ВК перпендикулярна до напрямку повітряного потоку) уловлюють вітер будь якого напрямку та поділяються на чотири типи різних конструкцій роторів. В конструкціях ВГ з вертикальною віссю обертання відсутня необхідність орієнтації на вітер, що є недоліком конструкцій з горизонтальною віссю обертання. Але вертикальні конструкції вимагають високих стартових зусиль для розкручування, також в них неможливо використовувати потенціал висотних повітряних мас. У вертикальних ВГ при обертанні проти вітрових потоків цей ВГ несе втрати, які можуть привести до того, що ефективність застосування вітрогенераторів знижується вдвічі порівняно з установками, обладнаними горизонтальними вісями обертання ротору.

Вітроелектрогенератори з вертикальною віссю обертання унаслідок своєї геометрії при будь-якому напрямі вітру знаходяться в робочому положенні. Крім того, така схема дозволяє за рахунок лише подовження валу встановити редуктор з генераторами знизу башти. Принциповими недоліками таких установок є:

- набагато більша схильність їх до втомних та механічних руйнувань елементів конструкцій із-за автоколивальних процесів, що частіше виникають в них, оскільки протягом одного періоду обертання ротору, що повторюється циклічно суттєва зміна умов обтікання лопаті вітровим потоком;

- пульсація крутного моменту, що приводить до небажаних пульсацій вихідних параметрів генератора;

- низька частота обертання, що передбачає використання багатополюсних генераторів або мультиплексорів.

Через це переважна більшість вітроелектрогенераторів виконана по горизонтально - осьовій схемі, проте дослідження різних типів вертикально - осьових установок продовжуються.

Найбільш поширені типи вертикально-осьових установок такі (рисунок 5).

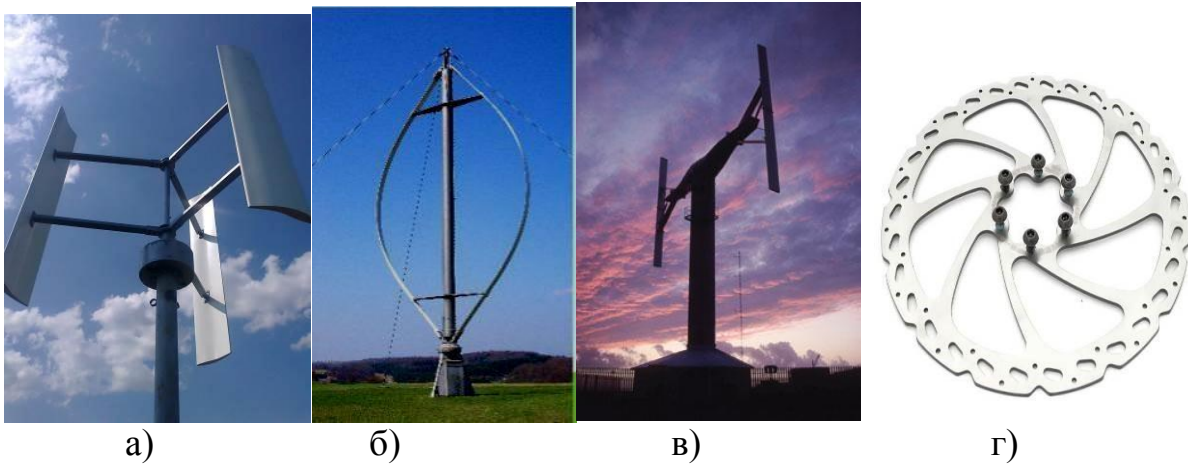


Рисунок 5 – Загальний вигляд вітроустановок с вертикальною віссю обертання ротору а) ротор Савоніуса, б) ротор Дар'є, в) ротор Масгрува, г) ротор Еванса.

1) Чашковий ротор (анемометр). Вітроколесо цього типа обертається силоміць опору. Форма чашоподібної лопаті забезпечує практично лінійну залежність частоти обертання колеса від швидкості вітру.

2) Ротор Савоніуса належить до тихохідних конструкцій та використовується для виконання роботи, але не потребує розкручування для запуску. Це колесо обертається за допомогою сили опору лопатей, виконаних з тонких гнутих листів. Обертовий момент створюється завдяки різниці опорів, що оказує потоку повітря опукла та вогнута поверхні ротору. Цей тип ротору відрізняється простотою, але має низький КВЕВ 0,1 – 0,15. Інші три типи роторів Дар'є, ротор Масгрува та ротор Еванса належать до швидкохідних типів конструкцій та потребують розкручування для чого використовують струм з мережі, що знижує їх ефективність.

3) Ротор Дар'є в якому обертовий момент створюється підйомною силою, що виникає на двох або трьох гнутих лопатях та відрізняється достатньо високим КВЕВ 0,3 – 0,35. Ротор Дар'є який обладнаний двома – трима тонкими лопатями та обертається зі швидкістю, що в 3 – 4рази перевищує швидкість вітру. Однак для запуску ротору цього типу необхідний додатковий двигун, що розкручує його до номінальної швидкості. Вітрогенератор з вертикальною віссю обертання обладнаний трьома крилами, що закручені у вигляді спіралі, причому сила вітру здійснює вплив на спіральні лопаті як на вході до турбіни так і на виході з неї, що забезпечує умови для найбільшої ефективності його роботи.

4) Ротор Масгрува. Лопаті цього вітроколеса в робочому стані розташовані вертикально, але мають можливість обертатися або складатися довкола горизонтальної осі при відключенні. Існують різні варіанти роторів Масгрува, але всі вони відключаються при сильному вітрі.

5) Ротор Еванса. Лопаті цього ротора в аварійній ситуації і при управлінні обертаються довкола вертикальної осі.

Найбільш використовуваним з роторів вертикального типу є ротор Савоніуса який являє собою два або більше зміщених один відносно одного напівциліндрів з невеликим (10-15% від діаметру лопасті) перекриттям. Сила опору в ньому є контрольованою, а крутний момент турбіни можна регулювати шляхом збільшення розміру лопатей та відстані від центру мас а не вертикальної висоти. Сила, що виникає під дією напору вітру безпосередньо діє на вісь обертання турбіни, що дозволяє отримувати максимальну потужність при низьких швидкостях вітру. У зв'язку з хибними висновками науковців щодо низького співвідношення лінійної швидкості робочих органів до швидкості вітру розробка вертикально – осьових ВГ не проводилась майже 40 років. Лише в 60 – 70хх р спочатку канадськими, а після американськими та англійськими спеціалістами було експериментально доведено, що ці висновки не можуть бути застосовані роторами Дар'є. Нещодавно науковці ГРЦ «Вертикаль» розробили ротор Дар'є, який запускається сам по собі при швидкості вітру 3,5 – 4м/с в залежності від потужності ВА. Момент торкання цих ВГ значно більше нулю, а для самозапуску достатньо невеликого пориву вітру.

В 1920р во французький дослідник Дар'є запропонував новий тип ротору, інтенсивною розробкою якого почали займатись з 1970р. Нині вітрогенератор даного типу може розглядатись в якості головного конкуренту ВГ крильчастого типу. Ротор Дар'є являє собою симетричну конструкцію, що складається з двох або більше аеродинамічних крил, які закріплені на радіальних балках. На кожне з крил, що рухаються відносно потоку діє підйомна сила, величина якої залежить від куту між вектором швидкості потоку та миттєвої швидкості крила. Такі ротори мають різну форму (Ц, Д, Х, С, та ромб-образну конструкції) з однією, двома або більшою кількістю лопатей. Конфігурація лопатей, що обертаються з допомогою підйомної сили зазвичай мають аеродинамічну форму, що схожа на форму крил літаку. Враховуючи, що вектор миттєвої швидкості крила в процесі обертання ротору змінюється циклічно в процесі обертання ротору момент сили, що розвивається ротором також є змінним. Оскільки, для виникнення підйомної сили необхідний рух крил, ротор Дар'є характеризується поганим розкручуванням, яке може покращитись при застосуванні трьох або більше лопатей. Сьогодні майже всі країни використовують вертикально – осьові ВГ з ротором Дар'є, причому в Канаді, США, Нідерландах перевага надається класичній конструкції з криволінійними лопатями, а у Великобританії та Румунії в якості головної схеми застосовують ротори з прямими лопатями, що паралельні до вісі обертання.

Концентратори

Потужність вітроенергоустановки залежить від ефективності використання енергії повітряного потоку. Одним із способів її підвищення є використання спеціальних концентраторів (підсилювачів) повітряного потоку. Для горизонтально-осьових вітроелектрогенераторів розроблені або запропоновані різні варіанти таких концентраторів. Це можуть бути

дифузори або конфузори (дефлектори), що направляють на вітроколесо повітряний потік з площі, більшої ометаємої площі ротора, і деякі інші пристрої. Широкого поширення в промислових установках концентратори доки не отримали.

Віндротори карусельного типу уловлюють вітер будь якого напрямку та швидкості. Коефіцієнт витягнення вітру в 1,5 – 3 рази вище ніж у конструкцій пропеллерного типу.

У більшості прикладних завдань вітроенергетики набагато важливіше знати не сумарну кількість енергії, яка може виробити вітроустановка, наприклад, за рік, а ту потужність, яку вона може забезпечувати постійно. При сильному вітрі, від 10 до 12 м/с, вітроустановки виробляють досить електроенергії, яку інколи навіть доводиться скидати в систему або запасати. Труднощі виникають в періоди тривалого затишшя або слабкого вітру. Тому для вітроенергетики є законом рахувати райони з середньою швидкістю вітру менше 5 м/с малопридатними для розміщення вітроустановок, а із швидкістю 8 м/с – дуже хорошими. Але незалежно від цього у всіх випадках потрібний ретельний вибір параметрів вітроустановок стосовно місцевих метеоумов.

Ефективність роботи ВК залежить від коефіцієнта швидкохідності Z , тобто відношення швидкості U_{ϑ} , кінців лопатей ВК до швидкості вітру U_i

$$Z_0 = \frac{U_{\vartheta}}{U_i} = \frac{R\omega_0}{U_i}, \quad (3)$$

де R - радіус вітроколеса (ВК), м;

ω_0 - кутова швидкість ВК, рад/с.

Оптимальна швидкохідність для n -лопатевого ВК наближено визначається як

$$Z_0 \approx 4\pi / n, \quad (4)$$

де n - кількість лопатей ВК.

Чим менше лопатей, тим більше швидкість.

Наприклад, для двохлопатевого вітроколеса $Z_0 = 4\pi / 2 \approx 6$,

для 4-х лопатевого ВК - C_{δ} максимальний при $Z_0 = 4\pi / 4 \approx 3$,

для 3-х лопатевого ВК - C_{δ} максимальний при $Z_0 = 4\pi / 3 \approx 4$.

ВЕУ з горизонтальною віссю обертання (коли вісь обертання ВК паралельна до напрямку повітряного потоку) потребують орієнтації за вітром та за типом ротору бувають швидкохідні (2 – 3лопаті) та тихохідні (від 4 до 20 лопатей). Швидкохідні конструкції призначені для вироблення електричної енергії; тихохідні призначені для здійснення роботи як помел зерна, підйом води та ін. ВГ з великою кількістю робочих органів використовується для виконання роботи тому що, завдяки низькому коефіцієнту окружної швидкості на кінці лопаті створюється висока стартова характеристика та таке обладнання може працювати при малих швидкостях вітру.

Собівартість енергії, що виробляється ВГ залежить від швидкості вітру, та за даними на 2004р складає при 7,16м/с – 4,8 цента кВт/ч; при

8,08м/с – 3,6 цента кВт/ч; при 9,32м/с – 2,6 цента кВт/ч, причому з розвитком встановлених потужностей вітроустановок собівартість буде знижуватись на 15 – 40%. Слід також відзначити, що собівартість електроенергії на вугільних електростанціях США складає 4,5 – 6 цента кВт/ч. В деяких штатах США собівартість природного газу та вугілля в 2005р зросла, що зробило вартість вітрової енергії менше вартості енергії з традиційних джерел.

Зазвичай проектувальник вибирає одну з двох взаємно несумісних задач:

- 1) максимальна кількість виробляємої електроенергії;
- 2) робота ВЕУ при мінімальній швидкості вітру $U_{i \min}$.

1.3.2 Обладнання робочого місця

1. Лабораторна установка ВГ;
2. Насадок пропелерного типу (горизонтальна вісь обертання ротору ВГ);
3. Насадок типу ротору Савоніуса (вертикальна вісь обертання ротору);
4. Лінійка;
5. Ключі 8×10;
6. Викрутка діелектрична.

1.3.3 Завдання для лабораторної роботи

Лабораторна установка для визначення основних параметрів вітрогенератору. включає два типи конструкцій роторів і дозволяє змінювати частоту обертання імітатору вітрового потоку, відстань від джерела вітру та кута атаки лопатей і реєструвати зміну напруги та сили струму (рисунки 6,7).

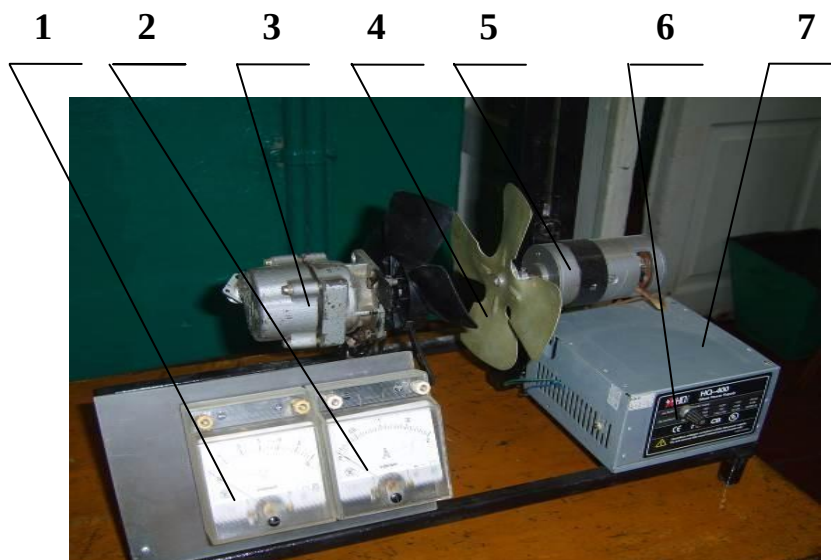


Рисунок 6. – Лабораторна модель вітрогенератору

1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – вітрогенератор; 4 – ротор імітатору вітрового потоку; 5 – імітатор вітрового потоку; 6 – регулятор частоти обертання імітатору ВГ; 7 – блок живлення.



Рисунок 7. – Змінні конструкції роторів лабораторного ВГ: а) з вертикальною віссю обертання ротору; б) з горизонтальною віссю обертання ротору.

1. Встановити модель ВГ у положення з горизонтальною віссю обертання ротору. Поступово змінюючи частоту обертання (що імітує швидкість вітрового потоку) знімати значення напруги та сили струму. Скласти таблицю та побудувати графік $P_z = U \cdot I = f(n)$.

Таблиця 1 – Результати дослідження параметрів ВГ з горизонтальною конструкцією вісі обертання ротору

Частота обертання ВГ, n , об/хв	Сила струму, I , А	Напруга ВГ, U , В	Потужність на валу ВГ, P , Вт
5000			
10000			
15000			
20000			

2. Встановити модель ВГ у положення з вертикальною віссю обертання ротору та встановити ротор. Поступово змінюючи частоту обертання, відстань від джерела вітру та кута атаки лопатей знімати значення напруги та сили струму. Заповнити таблиці та побудувати графіки $P_e = f(n)$, $P_e = f(I)$, $P_e = f(\varphi)$.

Таблиця 2. – Результати дослідження частоти обертання n імітатора повітряного потоку ВГ з вертикальною конструкцією вісі обертання ротору на потужність.

Частота обертання ВГ, n , об/хв	Сила струму, I , А	Напруга ВГ, U , В	Потужність на валу ВГ, P , Вт
5000			

10000			
15000			
20000			

Таблиця 3. – Результати дослідження відстані від джерела вітру l , ВГ з вертикальною конструкцією вісі обертання ротору на потужність при частоті обертання ротору ВГ $n = \dots$ об/хв.

Відстань від джерела вітру l , м	Сила струму, I , А	Напруга ВГ, U , В	Потужність на валу ВГ, P , Вт

Таблиця 4. – Результати дослідження кута атаки лопатей φ , ВГ з вертикальною конструкцією вісі обертання ротору на потужність при частоті обертання ротору ВГ $n = \dots$ об/хв..

Кут атаки лопатей ВГ з вертикальною віссю обертання ротору, φ	Сила струму, I , А	Напруга ВГ, U , В	Потужність на валу ВГ, P , Вт

3.Зробити висновок щодо того, який з типів роторів за даних умов є більш ефективним. Запропонувати шляхи підвищення потужності обох конструкцій роторів.

1.3.4 Завдання для практичного заняття

При заданій швидкості вітру розрахувати параметри для ВЕУ різної потужності. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці А.1 додатку А. Привести розрахунок для однієї потужності. Результати розрахунків для всіх потужностей звести в таблицю 1.

Визначити швидкість вітру, при якій кінці лопатей досягнуть швидкості звуку (330 м/с). Чи можна таке допустити?

Таблиця 5. – Результати розрахунку ВЕУ при $U_i = \dots$ м/с, $C_\theta = 0,3$; $\rho = 1,2$ кг/м³; кількість лопатей $n = \dots$, оптимальна швидкохідність $Z_o = \dots$.

P , кВт	D , м	ω_0 рад/с	n_0 об/с	T , с	$U_{\text{г}}$, м/с
1					
5					
10					
25					
50					
100					
250					

1.3.5 Приклади рішення

Приклад 1

Розрахувати потужність трилопатевої ВЕУ з ВК площею $1 \frac{1}{3} \text{ м}^2$ при швидкості вітру $U_{\text{г}} = 12 \text{ м/с}$ та вдвічі менше, при $C_{\text{д}} = 0,3$; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Рішення

За формулою (1) знаходимо потужність трилопатевої ВЕУ

$$P = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 12^3}{2} = 311 \text{ Вт.}$$

При швидкості вдвічі меншій ($U_{\text{г}} = 6 \text{ м/с}$) потужність ВЕУ за формулою (1) зменшиться у 8 разів

$$P = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 6^3}{2} \approx 39 \text{ Вт.}$$

Приклад 2

Розрахувати параметри ВК для ВЕУ потужністю 1 кВт. Умови попередні.

1) Із формули (2) знаходимо діаметр ВК

$$D^2 = \frac{8 \cdot 1000}{0,3 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 12^3} = 4,09 \text{ м}^2.$$

Тоді $D = \sqrt{4,09} = 2,02 \text{ м}$.

Для ВЕУ будь-якої потужності P (кВт) при заданих умовах ($U_{\text{г}} = 12 \text{ м/с}$) можна визначити діаметр D в метрах за формулою $D = 2,02 P^{\frac{1}{2}}$.

2) Визначаємо оптимальну швидкохідність ВК за формулою (4)

$$Z_{\text{г}} = 4 \cdot 3,14 / 3 \approx 4.$$

3) Із формули (3) визначаємо оптимальну кутову швидкість ВК

$$\omega_i = 2Z_i \frac{U_o}{D}$$

$$\omega_i = \frac{2 \cdot 4 \cdot 12}{2,02} = 47,5 \text{ рад/с.}$$

4) Оптимальна частота обертання ВК дорівнює

$$n_i = \frac{\omega_o}{2\pi};$$

$$n_i = \frac{47,5}{2 \cdot 3,14} \approx 7,6 \text{ с}^{-1}.$$

5) Визначаємо період обертання ВК

$$T = \frac{2\pi}{\omega_o};$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14}{47,5} = 0,13 \text{ с.}$$

6) Лінійна швидкість кінця лопаті визначається за формулою

$$U_e = R \cdot \omega_i;$$

$$U_e = 1,01 \cdot 47,5 \approx 48,0 \text{ м/с.}$$

7) Оцінити ефективність застосування різних режимів роботи ВК по співвідношенню швидкості U_e , кінців лопатей ВК до швидкості вітру U_i , тобто коефіцієнту швидкохідності.

1.4 Контрольні питання

- 1) Як визначити максимальну потужність вітроколеса (ВК)?
- 2) Як визначити оптимальну швидкохідність для п-лопатевого ВК?
- 3) Який з роторів конструкцій з вертикальною віссю обертання має найбільший КВЕВ?
- 4) Як потужність ВЕУ залежить від швидкості вітру?
- 5) Що таке період обертання ВК і як його визначити?
- 6) Як потужність ВЕУ залежить від діаметру ВК?
- 7) Чи має вплив і якщо має то який форма лопатей ВГ на його потужність?
- 8) Назвіть основні параметри ВЕУ.
- 9) Скільки лопатей мають найбільш економічні ВЕУ?
- 10) Що роблять з метою зниження динамічних навантажень у ВЕУ?
- 11) Від чого залежить ефективність роботи ВК?
- 12) Яке максимальне значення має коефіцієнт потужності для ВЕУ?
- 13) Для отримання енергії або тепла більш раціонально використовувати ВЕУ на сході, заході, півдні, півночі країни?
- 14) Які переваги та недоліки мають конструкції ВЕУ з горизонтальною та горизонтальною осями обертання ротору?

Рекомендована література

1. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии/ Дж.Твайделл, А.Уэйр / Пер. с англ.-М.: Энергоатомиздат, 1990-С. 105-242.
2. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі/ М.Корчемний, В.Федорейко, В.Щербань. - Тернопіль; Підручники і посібники 2001 -С.410-449.
3. Кирюшатов А.И. Использование нетрадиционных возобновляющихся источников энергии в сельскохозяйственном производстве/ А.И.Кирюшатов. - М.: Агропромиздат 1991.- 96 с.
4. Волеваха М.М., Гайса М.І. Енергетичні ресурси клімату України/ М.М.Волеваха, М.І.Гайса – К.: Наукова думка, 1967.-132 с.
5. Альтернативна енергетика [конспект лекцій для студентів природничих та інженерних спеціальностей] / В. В. Малишев, А. М. Поліщук, А. І. Габ, Д. Б. Шахнін ; Університет "Україна". - Київ : Університет "Україна", 2020. - 60 с. : граф., рис., табл. - Бібліогр.: с. 59.
6. Електроенергетичні та електромеханічні системи [Текст] = Electrical Power and Electromechanical System : наук. журнал / гол. ред. Орест Лозинський. - Львів : Вид-во Львів. політехніки.
7. Енергоефективність та відновлювальна енергетика в Україні: проблеми управління [Текст] : монографія / за заг. ред. І. М. Сотник. - Суми : Вид-во "Університетська книга", 2021. - 247 с. : граф., табл. - Бібліогр.: с. 218-246.
8. Електричні системи та мережі [Текст] : навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів / Г. О. Шеїна ; Держ. вищ. навч. закл. "Донец. нац. техн. ун-т". - Покровськ : ДВНЗ "ДонНТУ", 2020. - 200 с.

Додаток А

Таблиця А1 – Вихідні дані для розрахунку вітроустановки

№ варіанту	Швидкість вітру U_i , м/с	Кількість лопатей, n
1.	4,0	2
2.	4,5	3
3.	5,0	4
4.	5,5	2
5.	6,0	3
6.	6,5	4
7.	7,0	2
8.	7,5	3
9.	8,0	4
10.	8,5	2
11.	9,0	3
12.	4,2	4
13.	4,8	2
14.	5,3	3
15.	5,7	4
16.	6,3	2
17.	6,8	3
18.	7,2	4
19.	7,7	2
20.	8,3	3
21.	8,8	4
22.	9,2	2
23.	4,7	3
24.	4,3	4
25.	5,9	2

Юрченко Олександр Юрійович

МОНТАЖ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Методичні вказівки до виконання лабораторних занять

для студентів 1ст курсу спеціальності

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

ОС «Бакалавр».

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет,
вул. Г. Кондратьєва, 160

Підписано до друку: ____ 2022 р. Формат: А5 Гарнітура: Times New Roman.

Тираж: _____ примірників

Замовлення

Ум. друк. Арк.