

ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА

1. Основи вітрової енергетики

Енергія вітру має ряд специфічних особливостей: малу концентрацію, віднесену до одиниці об'єму повітряного потоку; випадковий характер зміни швидкості. Повсюдне розповсюдження цього джерела енергії, досконалі технічні засоби вітроенергетики і їх економічна ефективність дозволяють розглядати його як доповнення до “великої” енергетики, а насамперед для забезпечення енергією споживачів у важкодоступних районах, віддалених від джерела централізованого енергопостачання перетворення.

Враховуючи явні переваги електричної енергії з точки зору її генерації, передачі, розподілу і перетворення, переважного розвитку і поширення набули вітроелектричні установки (ВЕУ).

Вітроелектрична установка (ВЕУ) (у зарубіжній літературі їх називають вітротурбіни) представляє собою комплекс взаємопов'язаного обладнання, призначений для перетворення енергії вітру в електричну із заданою якістю. Найбільше поширення з установок, що приєднуються до мережі, сьогодні одержали ВЕУ з потужністю від 200 до 2500 кВт. Є тенденція до збільшення потужності встановлених ВЕУ, що зменшує втрати на кВт встановленої потужності і відповідно собівартість виробленої електроенергії. Сучасні ВЕУ сягають до 10 МВт потужності.

До складу ВЕУ входить: вітроенергетичний агрегат, накопичувач енергії - акумулятор або ін. (за необхідності) і система керування режимів роботи. Вітроагрегат, будучи основною частиною ВЕУ, складається з вітродвигуна, системи передачі вітрової потужності на навантаження (споживачу) і самого споживача вітрової енергії (генератора, нагрівача і т. п.). Вітродвигун – пристрій для перетворення кінетичної енергії потоку повітря у механічну роботу. Складова частина вітродвигуна є вітроколесо (ВК), яка призначена для перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію обертання валу вітродвигуна.

Вітроелектрична станція (ВЕС) об'єднує в єдиний енергетичний комплекс від декількох одиниць до декількох десятків ВЕУ.

Фізичні основи використання енергії вітру.

Рух повітряних мас у атмосфері – вітровий потік– виникає під дією різниці тиску повітря в різних точках атмосфери. Різниця тиску зазвичай виникає через різницю температур повітряних мас. Однією з причин виникнення вітру є також обертання Землі навколо своєї осі. Зважаючи на рельєфні особливості місцевості, віддаленість від морів і океанів, пори року, сила і напрям – основні характеристики вітру – змінюються за різними законами, тому енергія вітру в кожній точці поверхні змінюється в широких межах.

Кінетична енергія вітрового потоку:

$$E = m \cdot V_0^2 / 2, \tag{3.1}$$

де m – маса повітря, що рухається, $m = \rho_{\text{пов}} \cdot F_k \cdot V_0$, кг;

V_0 – швидкість вітру, м/с.

Потужність потоку вітру на ВК (витрата кінетичної енергії в секунду):

$$N_{\text{ВК}} = E/t = 1/2 \cdot (\rho_{\text{пов}} \cdot F_k \cdot V_0^3), \text{ Вт.} \tag{3.2}$$

де $\rho_{\text{пов}}$ - густина повітря (кг/м³). При нормальному атмосферному тиску (760 мм рт.ст.) і температурі повітря 0 °С $\rho_{\text{пов}} = 1,29$ кг/м³;

F_k – площа диску (м²), що створюється в процесі обертання ВК, через котру проходить вітровий потік, $F_k = \pi R^2$, R -радіус ВК;

На кінетичну енергію потоку вітру чинять вплив такі фактори, як швидкість вітру, густина повітря. Для кожної місцевості зміна швидкості вітру за висотою (епюра швидкості вітру) має характерний вигляд, наведений на рис. 3.1. Потенціал енергії вітру за регіонами наводиться на висоті $h_0 = 10$ м від поверхні Землі. Зі збільшенням висоти швидкість вітру збільшується .

$$V_1 = V_0 \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^k \tag{3.3}$$

де V_1 — швидкість вітру на заданій висоті;
 V_0 - швидкість вітру на відомій висоті (для метеостанцій $h_0 = 10$ м);
 h_1 — висота, на якій необхідно визначити швидкість вітру,
 k - емпіричний показник шорсткості поверхні.

Значення k в багатьох роботах приймається $k = 0,143$. У нормативних документах рекомендують $k = 0,2$. У США, для різних місць представлені значення від 0,2 до 0,26. При вимірах на різних висотах, значення k досягають 0,34. В окремих роботах для України використовується $k = 0,167$.

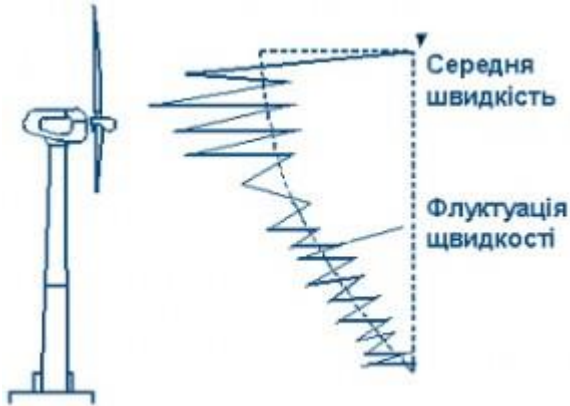


Рисунок. 3.1. - Епюра швидкості вітру

Зі зростанням швидкості вітру спостерігається зростання силового навантаження на ВК і воно може не витримувати перевантажень в умовах вітрових потоків зі швидкостями вітру більше 20 м/с. Для захисту ВК в такому випадку впроваджуються різноманітні інженерно-технологічні заходи.

Густина повітря суттєво залежить від атмосферного тиску і температури повітря. Сезонні температури повітря для України складають: взимку $t = - 5$ °С, навесні і восени $t = + 10$ °С, влітку $t = + 20$ °С. При величині атмосферного тиску, що близько до нормальної, густина повітря складає: для зимового періоду $\rho_{\text{пов}} = 1,32$ кг/м³, для літнього $\rho_{\text{пов}} = 1,21$ кг/м³, осінньо-весіннього $\rho_{\text{пов}} = 1,25$ кг/м³. За інших умов ці значення змінюються.

Відомо, що з підвищенням висоти тиск повітря падає. На невеликих висотах, які використовуються у вітроенергетиці, кожні 12

м підвищення висоти призводять до зменшення атмосферного тиску на 1 мм. рт. ст.

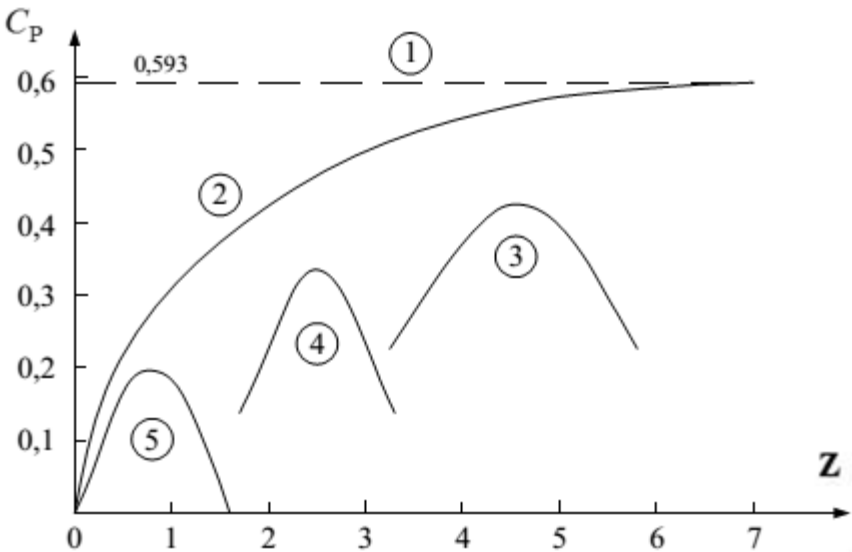
Наприклад для потужних офшорних ВЕУ, які встановлюються в прибережних зонах морів з висотою осі обертання лопатей ВК 120 м, зміна тиску становитиме величину 1,32 %. Відповідно на цю ж, практично несуттєву величину, зменшиться залежна від тиску питома щільність повітря. Зміна ж температури від -25 °С до +25 °С призведе до зменшення щільності, а отже і маси повітря майже на 20 %.

Потужність ВЕУ:

$$N_{ВЕУ} = C_p \cdot N_{ВК} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген} = 1/2 \cdot C_p \cdot \rho_{пов} \cdot F_k \cdot V_0^3 \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген}, \text{ Вт}, (3.4)$$

де C_p – коефіцієнт потужності (тобто ефективність використання енергії вітрового потоку даним ВК, що залежить від конструктивних особливостей даного колеса і швидкохідності), рис. 3.2.

$\eta_{мех}, \eta_{ген}$ - механічний ККД (0,75-0,85), ККД генератора (0,9-0,97).



1 – межа Бетца; 2 – ідеальне ВК; 3 – швидкохідне ВК (ротор Дар'є 2-3 лопаті); 4 – ВК середньої швидкохідності (ротор Дар'є 4-6 лопатей); 5 – ВК низької швидкохідності (ротор Савоніуса).

Рисунок. 3.2. - Залежності коефіцієнту потужності різних типів ВК

Швидкохідність ($Z = \omega R/V_0$) означає співвідношення лінійної швидкості кінця лопаті до фактичної швидкості повітряного потоку. Кінець лопаті зазвичай рухається у площині ВК з швидкістю яка в декілька разів більша швидкості повітряного потоку.

ω , R – кутова швидкість та радіус ВК.

ВК, розміщене в потоці повітря, може у кращому випадку теоретично перетворювати в механічну енергію на його валу $16/27 = 0,593$ (критерій Бетца) потужності енергії повітряного потоку. Цей коефіцієнт можна назвати теоретичним ККД ідеального ВК. Насправді ККД нижчий і досягає для найкращих швидкохідних вітряних коліс приблизно 0,45. Для реальних конструкцій коефіцієнт сягає значень $C_p \approx 0,35 \div 0,45$.

Крім цього, на роботу ВЕУ чинять вплив і такі чинники, як вертикальний профіль повітряних потоків (зміна його швидкості з висотою в приземному шарі повітря), поривчатість вітру і його гранична швидкість. Швидкість вітру з висотою зростає, а поривчастість потоку і його прискорення зменшуються. Поривчастість потоку виражається в прискоренні потоку, тривалості поривів вітру і їх співвідношенні в різних точках робочої поверхні ВК, що омивається вітром.

При побудові ВЕУ важливо забезпечити механічну міцність при випадкових екстремальних змін швидкості вітрового потоку.

Вітроелектричні установки.

Енергію вітру найчастіше використовують для генерування електричної енергії. Основним конструктивним вузлом ВЕУ є вітроагрегат до складу якого входять ВК, мультиплікатор (підвищувальний редуктор), перетворювач і генератор. ВК під дією вітру створює обертовий момент на валу генератора. Для узгодження частоти обертання ВК і частоти мережі використовують мультиплікатор або мультиплікатор з перетворювачем частоти. Також ВЕУ комплектують системою керування роботою вітроагрегату і генератором.

Існує два основних типи ВЕУ – з вертикальною, рис. 3.3 і горизонтальною віссю обертання ВК, рис. 3.4.



**а) з ротором Савоніуса; б) з ротором Масгрува; в) з ротором Дар'є;
Рисунок. 3.3. - ВЕУ з вертикальною віссю обертання**



**а) однолопатева; б) дволопатева; в) трилопатева;
Рисунок. 3.4. - ВЕУ з горизонтальною віссю обертання**

ВЕУ з горизонтальною віссю обертання найбільш ефективні, коли потік повітря перпендикулярний площині обертання лопатей. Для забезпечення цієї умови в складі ВЕУ потрібно пристрій

автоматичного повороту вісі обертання. Зазвичай цю роль виконує крилостабілізатор або відповідна система орієнтації вітродвигуна. За геометрією вітроколеса ВЕУ з горизонтальною віссю обертання поділяють на одно-, дво-, три- і багатолопатеві. Як правило багатолопатеві агрегати працюють з низькою швидкістю обертання, проте мають великий обертовий момент, тому їх використовують в якості приводів насосів та інших виконавчих пристроїв. Більшість сучасних ВЕУ оснащують трилопатевиими ВК з горизонтальною віссю обертання, оскільки аеродинамічні втрати за умови їх використанні менші на 10 %, ніж у дволопатевиих і на 4 %, ніж у однолопатевиих ВК.

Вітродвигуни з вертикальною віссю обертання можуть працювати при будь-якому напрямку вітру без зміни свого напрямку. ВЕУ з вертикальною віссю обертання мають наступні переваги:

- відсутність системи орієнтації за напрямом вітру, оскільки ефективність роботи ВЕУ з вертикальною віссю визначається лише швидкістю вітру і не залежить від його орієнтації;

- вісь обертання ротора генератора співпадає з віссю обертання вітроколеса, тому генератор і редуктор розміщують внизу ВЕУ;

- менше навантаження на опору ВЕУ.

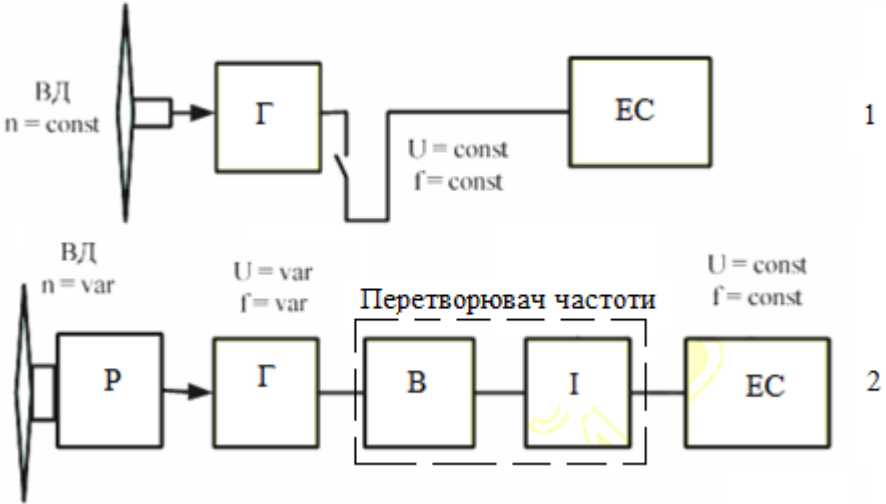
Незважаючи на ці переваги, ВЕУ з вертикальною віссю обертання не знайшли широкого застосування (ККД становить 20-30%).

Це пов'язано з тим, що ВЕУ з горизонтальною віссю обертання мають більший ККД 25-35% і меншу вартість. Трилопатеві ВК мають високу швидкість обертання, тому їх, як правило, під'єднують до електрогенераторів. Їх основним недоліком була висока стартова швидкість (4-6) м/с, у сучасних ВЕУ значення цього показника знижено до (2-3) м/с. Використання в сучасних конструкціях ВЕУ швидкохідних вітродвигунів (ВД) дозволяє виключити зі складу ветроагрегата мультиплікатор (підвищувальний редуктор) і поліпшити тим самим масо-габаритні, вартісні і експлуатаційні характеристики ВЕУ. Окремим випадком реалізації становить ВЕУ з горизонтальною віссю обертання становить ВЕУ з аеродинамічною мультиплікацією (ВЕУ АМ), в яких генератори встановлені на лопатях ВК.

Принципово можлива робота ВД в двох режимах: з постійною частотою обертання ($n = \text{const}$) і зі змінною частотою ($n = \text{var}$), рис.3.5. Робота ВД зі змінною частотою обертання ($n = \text{var}$) ефективніша, оскільки може забезпечити максимальний обсяг потужності при будь-якій швидкості вітру. Режим з постійними оборотами не може

забезпечити настільки ж ефективну роботу ВЕУ при змінній швидкості вітру. Ця обставина визначає наявність перетворювача частоти в складі енергетичного обладнання сучасних ВЕУ, якій працює, як правило, в режимі змінних оборотів.

Перетворювач частоти перетворює енергію генератора ВЕУ в електричну енергію з заданими параметрами ($U = \text{const}$, $f = \text{const}$).



**Рисунок. 3.5 – Блок схема роботи ВД в двох режимах:
1- з постійною частотою; 2- зі змінною частотою обертання,
ВД - вітродвигун, Р - редуктор, Г - генератор, В - випрямляч,
І – інвертор, ЕС – енергосистема.**

З точки зору діапазону потужностей ВЕУ можна розділити на ВЕУ, призначені для «великої» енергетики і малі ВЕУ, які перспективні для систем автономного електропостачання. Традиційна компоновка ВЕУ передбачає використання крильчатого вітроколеса з горизонтальною віссю обертання.

Слід зазначити, що найбільші успіхи вітроенергетики в світі характерні саме для великої енергетики. Це пояснюється з одного боку більш високою енергоефективністю великих вітроелектростанцій, а з іншого - обмеженістю або відсутністю децентралізованих зон електропостачання в країнах з високорозвиненою транспортною та іншою інфраструктурою.

Більш висока енергоефективність великих ВЕУ визначається вищим і стабільним енергетичним потенціалом вітру на висоті їх вежі, яка досягає 100 м и більше. Крім того, робота ВЕУ на електроенергетичну систему полегшує узгодження можливої величини (при даної швидкості вітру) електроенергії, що генерується. Наявність енергосистеми усуває необхідність в пристроях накопичення енергії і резервних енергоджерел, які необхідні для автономних вітроелектростанцій.

Мережева ВЕУ підключена до системи набагато більшої потужності, ніж сама ВЕУ та працює паралельно енергосистемою . В цьому випадку використовуються ВЕУ великих одиничних потужностей (від 1 до 10 МВт), зібраних у ВЕС. ВЕУ даного класу мають великі геометричні розміри і масу, а, отже, і напружені режими роботи механічного устаткування. Електроенергія, що виробляє ВЕУ повністю подається в енергосистему. Паралельна робота ВЕУ з енергосистемою (рис. 3.6) при змінній частоті обертання ВД ($U = var, f = var$) можлива за рахунок перетворювача частоти (випрямляч, ємність фільтра і інвертор), який віддає в мережу якісну електроенергію ($U = const, f = const$). Потужність, яку генератор віддає в мережу, залежить від обертаючого моменту двигуна і визначається силою вітру. При слабкому вітрі споживачі забезпечуються електроенергією від енергосистеми. Паралельна робота з мережею дає можливість збільшувати одиничну потужність ВЕУ, знижувати вартість електроенергії, забезпечує необхідну якість енергії і надійність електропостачання споживачів.

Блок схема мережевої ВЕУ наведено на рис. 3.6.



Рисунок. 3.6. - Блок схема мережевої ВЕУ:

1 - вітродвигун; 2 – мультиплікатор (редуктор) ; 3 – генератор змінного струму 3 - випрямляч; 5 - інвертор; 6 – мережа.

Найбільш дешевим і, можливо, безпечним типом вітрогенератора є асинхронний генератор змінного струму, підключений безпосередньо в енергосистему і введомий нею.

Для електропостачання невеликих, розосереджених споживачів потрібні автономні ВЕУ відносно малої потужності. Мінливість енергії вітру вимагає мати в складі ВЕУ накопичувач енергії, в якості якого зазвичай використовується АКБ. Сучасним рішенням конструкції генератора ВЕУ малої потужності є безредукторний багатополосний синхронний генератор з збудженням від постійних магнітів і напівпровідниковий випрямляч вихідної напруги статорної обмотки. Для стабілізації напруги, що генерується і забезпечення оптимального режиму зарядки АКБ передбачається регулятор напруги (контролер).

Отримання змінної напруги стандартних параметрів здійснюється за допомогою автономного інвертора. Вихідна напруга на навантаженні автономної ВЕУ повинна коливатися в межах 210 -230В.

Блок схема автономної ВЕУ наведено на рис. 3.7.

Автономні ВЕУ, не підключені до енергосистеми для паралельної роботи. Потужність таких ВЕУ використовується для освітлення, електроживлення маяків, засобів зв'язку та ін. і, як правило, не перевищує 5 кВт. Якщо енергія таких ВЕУ використовується для опалювання, то їх потужність може досягати 20 кВт і більше.

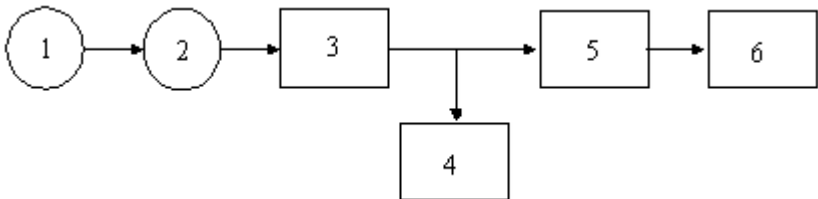


Рисунок. 3.7. - Блок схема автономної ВЕУ:

1 - вітродвигун; 2 - генератор; 3 - випрямно-зарядний пристрій; 4 - АКБ; 5 - автономний інвертор; 6 - навантаження ВЕУ

У автономних ВЕУ використовуються електрогенератори різних типів, найчастіше багатополосні генератори з постійними магнітами, класичні синхронні генератори з нестабілізованими і стабілізованими електричними параметрами на виході, асинхронні генератори з самозбудженням або допоміжним збудженням і т.п. Вартість таких ВЕУ багато в чому залежить від вибору системи управління

електричним генератором. При простих електричних схемах напруга і частота (у разі генератора змінного струму) на виході генератора будуть нестабільними і нестандартними, проте енергія з успіхом може бути утилізована за допомогою випрямлячів, електричних акумуляторів і нагрівальних пристроїв.

Структурні схеми автономних та мережевих ВЕУ, режими їх роботи різні. При розгляді конструктивних схем розрізняють тип вітродвигуна, спосіб керування ним у робочому і пусковому режимах. По кожному із зазначених елементів необхідно зробити оптимальний вибір на основі порівняльного аналізу можливих варіантів.

Основні технічні характеристики деяких ВЕУ наведені в додатку В, табл. В.1-В.5.

Приклад. Розрахувати потужність ВЕУ з горизонтальною віссю обертання радіусом ротора R (м) при швидкості вітру V_0 , коефіцієнту потужності C_p , ККД механічного редуктора - $\eta_{\text{мех}}$; ККД генератора - $\eta_{\text{ген}}$ та щільність повітря $\rho_{\text{пов}}$ (стандартне значення для осінньо-весіннього періоду $\rho_{\text{пов}} = 1,225 \text{ кг/м}^3$);

$$R = 7 \text{ м}; V_0 = 6,4 \text{ м/с}; C_p = 0,35; \eta_{\text{мех}} = 0,75; \eta_{\text{ген}} = 0,86.$$

Рішення:

Потужність ВЕУ:

$$N_{\text{ВЕУ}} = 1/2 \cdot C_p \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_0^3 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}}$$

$$N_{\text{ВЕУ}} = 0,5 \cdot 0,35 \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot 7^2 \cdot 6,4^3 \cdot 0,75 \cdot 0,86 = 5576,98 \text{ Вт} = 5,6 \text{ кВт}$$

2. Побудова вітроелектричних установок з горизонтальною віссю обертання

У потужних сучасних ВЕУ з горизонтальною віссю обертання всі виконавчі пристрої розміщено у верхній частині опорної башти –

гондолі, яку закріплюють на фундаменті. Зовнішній вид ВЕУ та компоновка у гондолі показано на рис. 3.8.

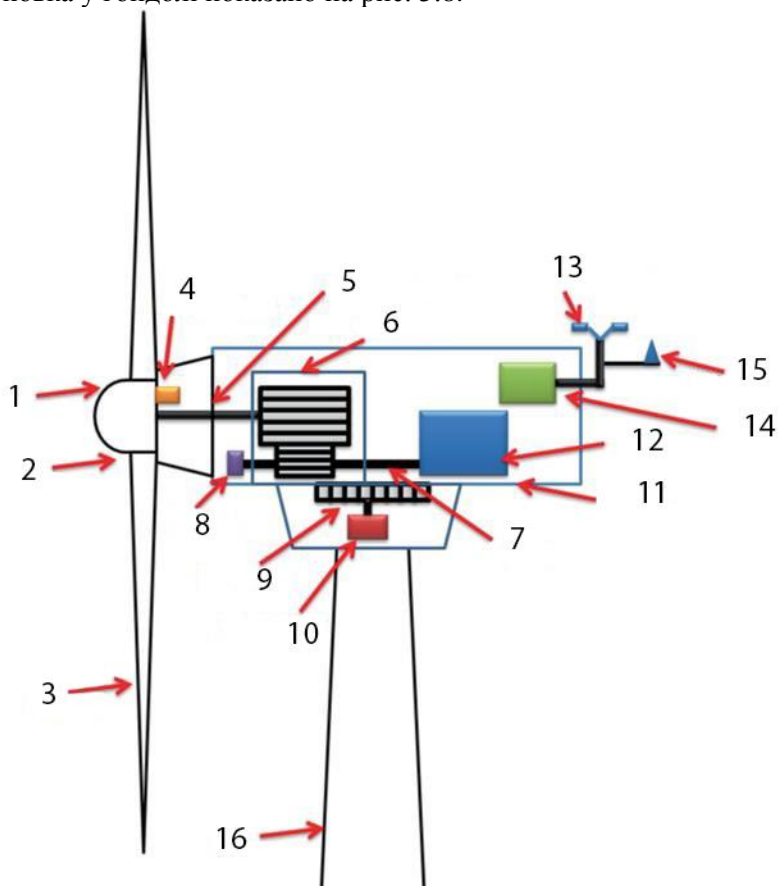


Рисунок.3.8. - Компоновка агрегатів у гондолі ВЕУ:

1 – ротор; 2 - ковпак ротора; 3 - лопаті; 4 - система зміни кута атаки лопаті; 5 – низькошвидкісний вал; 6 – мультиплікатор; 7 - високошвидкісний вал; 8 – гальмо; 9 –привод повороту гондולי; 10 – мотор повороту гондולי; 11-гондולה; 12 – генератор; 13 – анемометр;14 – контролер; 15 – флюгер; 16 – вежа.

ВК установки закріплюється на горизонтальному валу, що обертається з використанням двох підшипників, змонтованих у головці вітродвигуна. Обертання ВК передається електрогенератору через механічний редуктор (мультиплікатор). Головка вітродвигуна монтується на башті, висота якої визначається з розрахунком виносу вітроколеса вище від усіх оточуючих перешкод, що можуть впливати на потоки повітря. Позаду гондоли закріплюється хвіст для встановлення ВК на вітер. Потужність вітродвигуна без регулюючого пристрою збільшується або зменшується пропорційно кубу швидкості вітру, наслідком чого є нерівномірність роботи електрогенератора. Щоб усунути цю ваду у вітродвигуні застосовано автоматичне регулювання швидкості обертання електрогенератора або використовується перетворювач частоти.

Компоновка ВЕУ складається з наступних частин:

1) ротор – система обертових аеродинамічних елементів (лопатей), що приєднані до єдиного валу, і призначена для перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію обертового валу. Ротор може бути навітровим (в робочому стані розташовується відносно напрямку повітряного потоку перед опорою) і підвітровим (в робочому стані розташовується відносно напрямку повітряного потоку за опорою). Ротор з лопатями або вітродвигун виконує перетворення кінетичної енергії вітру в механічну;

3) лопаті - частина ротора, яка безпосередньо контактує з повітряними масами і обертається під їх впливом. В потужних ВЕУ лопаті мають додатковий привід, який змінює кут профілю крила залежно від швидкості вітру;

4) система керування поворотом гондоли – утримує вісь ротора у напрямі повітряного потоку з найменшим відхиленням;

5,7) трансмісія – система для передачі крутного моменту від валу ротора до робочої машини;

6) мультиплікатор - підвищуючий механічний редуктор. Мультиплікатор, високошвидкісний і низькошвидкісний вали призначений для перетворення механічної енергії ротора з вихідними параметрами в механічну енергію з параметрами, необхідними для роботи генератора;

8) гальмівний пристрій (гальмо) - використовується для зупинки ротора при виникненні критичних швидкостей (вище ніж 30 м/с);

9,10) опорно- поворотний пристрій (привод та мотор повороту) - служить для повертання гондоли та ротора при змінах напрямку вітру. Даний пристрій може мати допоміжний конструктивний елемент – віндрозу, що являє собою багатолопатевий ротор для приведення в дію опорно-поворотної системи у напрямку повітряного потоку;

11) гондола – частина вітроустановки, що розташовується на вершині опори і служить для розміщення вузлів кріплення валу ротора, мультиплікатора, трансмісії та (або) інших елементів;

12) генератор - виконує перетворення механічної енергії в електричну енергію;

13) анемометр - датчик швидкості вітру;

14) контролер - пристрій управління. Запускає вітроагрегат при появі робочої швидкості вітру і відключає при великій швидкості, яка може пошкодити робочі механізми;

15) флюгер - пристрій для визначення напрямку вітру. Передає отримані дані в контролер.

16) вежа - тримає гондолу та ротор над поверхнею землі. Висота опори вибирається не тільки з умови росту швидкості вітру, але й з врахуванням умов монтажу, ремонту, обслуговування, ваги та вартості; чим вона вища, тим більше енергії вітру можуть «захопити» лопаті.

Лопаті є найбільш складним і дорогим елементом ВЕУ. Сучасні ВЕУ потужністю (від 1 до 10 МВт) мають лопаті розміром 30-60 м. Розмір лопатей обмежено граничною лінійною швидкістю їх кінців.

За кордоном проектуванням і виготовленням лопатей займаються найбільш розвинені фірми: авіаційні (Boeing), аерокосмічні, суднобудівельні. Складність виготовлення лопаті для швидкохідної ВЕУ пояснюється високими вимогами, що висуваються до лопаті: висока міцність на розривання і вигинання, відносно не висока маса, здатність працювати в широкому діапазоні температур (- 50°C...+60 °C), стійкість до обмерзання, точність форми профілю лопаті, низька шорсткість поверхні. Крім того, лопаті мають складну геометричну форму: повздожне гвинтове кручення, змінну хорду профілю за довжиною, обтічні торці лопатей і т.д. Вказаним вимогам відповідають лопаті, виконані з композитних матеріалів, склопластиків, пресованого алюмінію.

Силова трансмісія утворена валом ротора ВЕУ, встановленим в підшипниках. На першому валу встановлені лопаті, другий кінець валу

через пружну (або іншу) муфту з'єднаний з тихохідним валом мультиплікатора, що задовольняє вимогам за передавальним відношенням обертаючого моменту, швидкості обертання і т.д. Швидкохідний вал мультиплікатора через пружну муфту пов'язаний з навантаженням, для якого зазвичай використовується електрогенератор (або компресор).

ВЕУ містить гальмівний пристрій (стрічковий, дисковий або колодковий), розміщений найчастіше на швидкохідному валу мультиплікатора (або на другому вихідному кінці вала електрогенератора). Гальмівний пристрій повинен забезпечувати плавне гальмування ротора без перевантажень за моментом, що може досягатися уведенням до складу гальма пружної ланки (пружини) або дроселя у разі використання гідравлічного приводу в гальмівному пристрої. Для зменшення перевантажень за моментом, при гальмуванні роторів потужних ВЕУ часто застосовують спільно з гальмуванням валу ротора аеродинамічне гальмування поворотом лопаті.

Для орієнтації ротора на вітер використовують поворот гондоли ВЕУ відносно опори, для чого застосовують опорний підшипник, встановлений між гондолою і опорою. ВЕУ потужністю 0,1-1 кВт орієнтуються на вітер, як правило, за допомогою хвоста (флюгерного пристрою на консолі). ВЕУ більшої потужності використовують для повороту гондоли на вітер віндрозний черв'ячний механізм з додатковими одним або двома малими роторами. Коли потужність вітроустановки досягає 100 і більш кВт, то використовується електропривод (мотор-редуктор) з великим передавальним відношенням, який забезпечує низьку кутову швидкість повороту гондоли з тим, щоб понизити величину гіроскопічного моменту, що виникає на лопатях ротора. При цьому блок керування виконавчим електродвигуном пов'язується з датчиком напрямку вітру, що встановлюється на гондолі вітроустановки і є анеморумбографом з власним хвостовим пристроєм.

Генератори ВЕУ бувають різних типів, наприклад генератори постійного струму, асинхронні генератори, вентильні (синхронні) та інші. Тип генератора визначається розробником ВЕУ і вибирається з умов експлуатації, вимог до потужності і якості електричної енергії, що генерується.

Кутова швидкість обертання вітроколеса зазвичай суттєво менша ніж частота струму мережі, тому між ВК і ротором генератора встановлюють мультиплікатор. Це дозволяє суттєво зменшити масу і собівартість генератора. Передавальне число мультиплікатора залежить від співвідношення частоти обертання вітроколеса і числа пар полюсів вітрогенератора, частота якого як правило не співпадає з частотою мережі. Для підключення до неї необхідна наявність перетворювачів частоти. Передавальне число мультиплікатора знаходиться в межах 5-50. Використання мультиплікатора призводить до додаткових втрат, що суттєво впливає на ККД ВЕУ. Для приклада трьохступеневий мультиплікатор з частотою обертання 600 об./ хв. має ККД 0,95 що для потужних стає неприємним. Вартість мультиплікатора становить 12...15% вартості ВЕУ, тому триває пошук нових рішень.

Деякі виробники проектують сучасні ВЕУ з безпосереднім з'єднанням роторів вітроколеса і генератора. Для таких систем використовують швидкохідні вітроколеса і генератори з декількома парами полюсів.

Наявність перетворювача частоти дозволяє використовувати тихходні (багатополусні) генератори без мультиплікатора, проте такі генератори мають високу вагу та собівартість. Ціна перетворювача частоти складає приблизно 20% від вартості ВЕУ. Відомо про створення генератора с потужністю 7,8 МВт (фірма Siemens), який обертається зі швидкістю ВК. Вага такого генератора сягає 250 тонн. Такі рішення мають окупність при потужностях більше 5 МВт і розміщенні в офшорних зонах де витрати на обслуговування мультиплікатора занадто зростають.

Система керування виконує такі функції:

- пуск і зупинка в нормальному режимі ВЕУ від датчика швидкості вітру;
- орієнтацію ВЕУ за напрямом вітру;
- гальмування ВК за великих швидкостей вітру (вище ніж 30м/с) та зупинка ВЕУ при аварійних режимах;
- зміна швидкості обертання (для ВЕУ з постійною або ступінчатою зміною швидкості обертання);
- включення в мережу, набір потужності та регулювання потужності;

- реєстрація та накопичення даних про швидкість вітру, потужності при виробленні електричної енергії в різних часових інтервалах: (доба, місяць, і т.п.), реєстрація та сигналізація про всі несправності; передача даних в центр управління енергосистеми;

Виконавчим механізмом системи орієнтації за напрямом вітру є електродвигун, вал якого з'єднано з системою обертання гондоли ВЕУ зубчатою передачею.

Кут повороту ВЕУ визначають за даними, отриманими від сенсорів швидкості і напрямку вітру.

Регулювання вихідної потужності здійснюють зміною швидкості обертання валу ВК залежно від швидкості вітру. Для цього застосовують два методи: зміна кута повороту лопатей (pitch-регулювання) і зрив потоку (stall-регулювання).

За умови використання pitch-регулювання змінюють кут орієнтації лопатей відносно напрямку вітру (кут атаки), що дозволяє регулювати механічну потужність на валу вітроколеса.

Stall- регулювання реалізують інакшим чином. Лінійна швидкість перерізу профілю ВК збільшується з віддаленням від осі обертання. Тому на певній відстані від центру обертання відбувається зрив потоку і підйомна сила перестає діяти на лопать, починаючи з цієї точки, лопать працює неефективно. Для забезпечення оптимального використання енергії потоку за різних швидкостей вітру, лопать закручується навколо своєї осі. Stall-регулювання забезпечує такі умови роботи ВК, що за різкого збільшення швидкості вітру, потужність на валу вітроколеса не збільшується. Цей метод ефективний для забезпечення постійної швидкості обертання вітроколеса.

Автоматична система керування приймає інформацію про стан і роботу механізмів установки, обробляє її за заданою програмою та забезпечує запускання, підтримування робочих параметрів, а також зупинку установки в аварійних ситуаціях.

При побудові конкретної установки, розробник повинен враховувати вимоги та кліматичні умови споживача, що в решті решт і впливає на кінцеву конструкцію ВЕУ.

3. Вітроелектричні установки з аеродинамічною мультиплікацією

Принципово особливу групу ВЕУ без мультиплікатора займають ВЕУ з аеродинамічною мультиплікацією (ВЕУ АМ). При аеродинамічній мультиплікації генератори встановлюються на лопатях ВК разом з вітровими турбінами (ВТ), вісь обертання яких знаходиться в площині обертання лопатей ВК рис. 3 9.

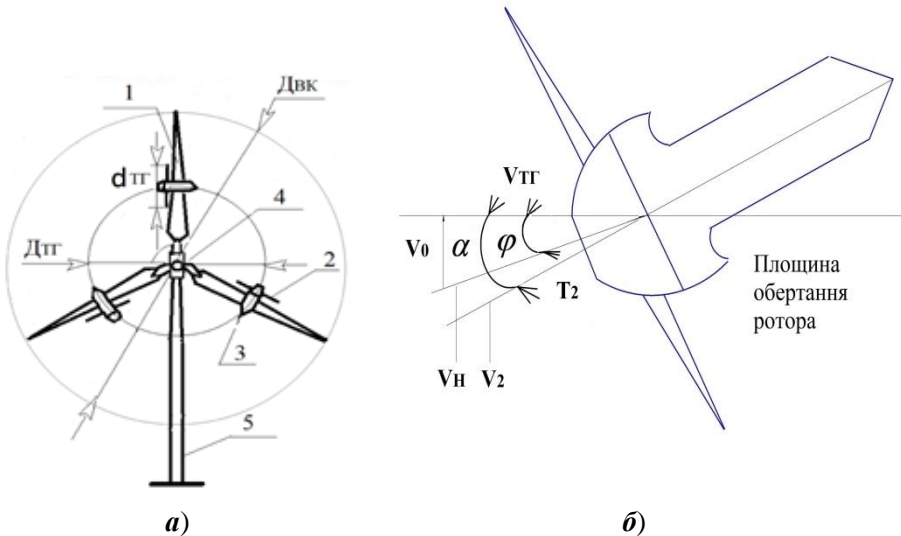


Рисунок. 3 9. - Схема турбогенераторної установки (а) та розташування вісі турбогенератора (б):
1 – лопаті основного ВК; 2 – генератори; 3 – турбіни (ВК) генераторів; 4 – гондола; 5 опора (башта)

Турбогенератори ВЕУ складаються з наступних основних частин:

- ротора (ступиця з лопатями);
- гондоли з опорно-поворотним пристроєм;
- металеві опори;
- системи генерування електричної енергії;
- системи автоматичного керування;

- системи безпеки, що забезпечує аварійне гальмування ротора при досягненні граничних значень частоти ротора, потужності що генерується, температури генераторів і інших несправностей.

Турбогенераторна ВЕУ АМ, маючи призначення для прямого підключення до мережі через її особливості (наявності 3-х індукторних генераторів), може працювати в режимі максимального відбору потужності при наявності синхронізуючої потужності, що виникає при підключенні до мережі живлення відповідної потужності. Ця особливість викликає ряд проблем, пов'язаних з роботою при малих обертах ротора (малих потоках вітру 2 ... 5 м / с).

Одна з проблем - зниження ефективності перетворення кінетичної енергії вітру в електричну. Для підвищення ефективності необхідно знижувати частоту обертання турбін генераторів, а, отже, і частоту і напругу, що вимагає установки додаткового перетворювача малої потужності для узгодження з мережею.

Постійність оборотів турбін при генеруванні енергії забезпечується за рахунок синхронізації останніх з мережею.

Зі збільшенням потужності ВЕУ виникає технічна проблема з встановленням масивного генератора на лопатях ротора, тому виникає проблема зниження ваги генератора за рахунок застосування більш високої частоти генератора, а, відповідно, необхідна установка узгоджувального перетворювача.

Крім того застосування перетворювача значно підвищить ефективність роботи ВЕУ АМ, але істотно збільшить собівартість і може знизити надійність .

На лопатях 1 (рис. 3.9) на діаметрі $D_{ТГ}$ встановлені генератори 2, на валу яких встановлені турбіни 3. Лопаті 1 кріпляться до ступиці, яка з'єднана через підшипниковий вузол з гондолою 4. У гондолі розташований струмознімач і гідросистема для повороту лопатей. Гондола має можливість орієнтуватися на вітер за рахунок електроприводів по команді системи керування.

Суть цієї схеми полягає в розташуванні генераторів на лопатях ВЕУ на відстані від 0,4 до 0,8 їх довжини від осі обертання. При цьому генератори забезпечені турбінами (вітроколесами без мультиплікатора), вісь обертання яких розташована в площині обертання основного ВК або з деяким кутом назустріч набігаючого потоку.

Це дозволяє відмовитися від механічного мультиплікатора та суттєво зменшує вартість ВЕУ. Важливою особливістю ВЕУ АМ є можливість генерувати електроенергію в мережу без перетворювача частоти при зміні швидкості вітрового потоку.

Оскільки генератори розташовані в просторі зі зрушенням 120 градусів, і при обертанні знаходяться на різній висоті, то через різні швидкості вітрового потоку по висоті, та через конструктивні особливості розташування осей турбін щодо площині вітрового колеса, на генератори впливає змінний момент.

Так як лінійна швидкість обертання турбогенераторів в 3 - 4 рази вище швидкості вітрового потоку на момент досягнення номінальної швидкості, то діаметр ВК турбогенераторів в 10 ... 15 разів менше діаметра основного ВК. Для ВЕУ потужністю 750 кВт діаметр ВК турбогенераторів становить всього 5,0 м при розташуванні турбогенераторів $D_{ТГ} \approx 0,485 D_{ВК}$. При номінальній швидкості вітру 12 м / с швидкість обертання ротора становить 31 об / хв, а швидкість потоку, що набігає на турбіни ~ 45 м / с. Швидкість обертання турбін 375 об / хв.

Застосування синхронного індукторного генератора дозволяє використовувати ВЕУ АМ для паралельної роботи з мережею.

Основні технічні характеристики ВЕУ АМ розробки ПКТБ «Конкорд» м. Дніпро наведені в додатку В, табл.В.6.

Позитивний результат застосування дослідницької ВЕУ АМ типу ТГ-750 дозволяє оптимістично оцінювати перспективу розвитку вітчизняних ВЕУ АМ.

Запитання

1. Особливості ВЕУ АМ.
2. Чому діаметр вітроколеса турбогенераторів ВЕУ АМ менше діаметра основного вітроколеса?
3. Чому на генератори впливає змінний момент ?