

УДК 539.3

Гайдайчук В.В., д-р техн. наук,
Носенко В.П.

ДИНАМІКА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ПІД ДІЄЮ ВІТРОВИХ ТА ІНЕРЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Вступ. Згідно сценарію розвитку вітроенергетики в світі до 2020 року, який представлений в документі “Wind Force 12”, розробленому спільно Грінпісом, INFORSE та Європейською асоціацією вітроенергетики, частка вітроенергетики в світовому виробництві електроенергії повинна досягнути 12%. Проведені дослідження показали, що в світі не існує ніяких технічних, економічних і ресурсних обмежень для досягнення цієї мети. До 2020 року є реальна можливість досягнути світового показника встановленої потужності ВЕУ в 1 260 000 МВт. Документ “Wind Force 12” відмічає, що до 2010 року світова вітроенергетична промисловість може вийти на рівень 320 000 МВт встановленої потужності, а європейська – 100 000 МВт. До 2010 року вартість світового вітроенергетичного ринку буде складати 133 млрд. євро, а сума інвестицій досягне 20 млрд. євро.

За останні два роки потужність вітроенергетики зросла в середньому на 30% в рік. Для порівняння, ріст атомної енергетики був менше 1%, в той час як збільшення кількості електроенергії, отриманої за рахунок спалювання вугілля, не було взагалі. Європа стала центром цієї молоді і високотехнологічної промисловості. 90% світового виробництва середніх і великих ВЕУ зосереджено в Європі. Середня встановлена потужність однієї ВЕУ зросла на 150 кВт і досягнула показника в 900 кВт.

Україна характеризується досить високими енергетичними потенціалами вітрового потоку в Карпатах, Криму, Причорномор'ї та Приазов'ї, де середньорічні швидкості вітру на висоті 10 м становлять 5 і більше метрів за секунду, що ставить вітрову енергію на перше місце серед відновлюваних джерел для виробництва електричної енергії.

Україна належить до енергодефіцитних країн, так як покриває потреби в енергоспоживанні за рахунок власних енергоресурсів приблизно на 40%, імпортуєчи 75% необхідного обсягу природного газу та 85% сирої нафти і нафтопродуктів. Така структура енергоспоживання породжує монополну залежність економіки України від країн-експортерів нафти й газу і є несприятливою для її енергетичної і національної безпеки.

Вітроенергетика України має достатній досвід виробництва, проектування, будівництва, експлуатації та обслуговування як

вітроенергетичних установок, так і вітроенергетичних станцій; в країні є достатньо високий науково-технічний потенціал і розвинена виробнича база. Останнім часом розвитку вітроенергетичного сектора сприяє державна підтримка, що забезпечує реалізацію ініціатив по вдосконаленню законодавства, структури керування, створенню зручних умов для внутрішніх і зовнішніх інвесторів.

Реалізація державних національних програм в області вітроенергетики на 2010 рік передбачає загальне річне виробництво електроенергії на вітроелектростанціях і автономних вітроустановках близько 5,71 млн. Мвт/год; що дозволить забезпечити близько 2,5 відсотків від загального річного електроспоживання в Україні. Тому проблема створення ефективних і надійних вітроенергетичних установок (ВЕУ) є актуальною.

В той же час слід зазначити, що в процесі експлуатації конструкції ВЕУ піддаються впливу різного роду динамічних навантажень, основними з яких є вітрові навантаження і сили інерції обертального руху лопатей. Їх вплив на коливання конструкції аналізується в [1-4]. Однак, як показано в [5-7], особливі динамічні ефекти в лопатях (і башти ВЕУ) виникають при складному обертанні ротора, коли його вісь під дією вітрового потоку розвертається. Вплив цих ефектів на загальну міцність і динамічну поведінку ВЕУ залишається мало вивченими до цього часу. Враховуючи порівняно високу частоту виникнення непередбачених поломок ВЕУ, можна зробити висновок, що проблема теоретичного моделювання їх динаміки є актуальною.

Конструкції ВЕУ. Вітроелектростанції існують в усьому світі. Вони ідеально підходять для потреб країн, що розвиваються, з їх необхідністю в терміновому введенні в експлуатацію нових потужностей. Вони можуть бути введені в лад і підключені до енергомережі за більш короткий строк і з меншими витратами в порівнянні із введенням більших електростанцій, яким необхідна складна інфраструктура по виробництву й передачі електроенергії. Відомо, що кількість енергії, виробленої за рахунок вітру, залежить від густини повітря, від площі, охопленої лопатіма вітротурбіни, і швидкості вітру. Через те, зимою повітря більш щільніше, вітряна установка виробляє зимою більше енергії, ніж влітку, при однаковій швидкості вітру. На території, розташованій високо над рівнем моря, наприклад, у горах, атмосферний тиск менший і, відповідно, менша густина повітря, але це цілком компенсується підвищеною швидкістю вітру. Висота щогли також може значно вплинути на продуктивність вітроенергетичної установки.

Вітроенергетичні установки представляють собою досить складний виріб. Багато з раніше розроблених зразків виявилися ненадійними, тому на даний час велика увага приділяється питанням теоретичного

моделювання їх міцності. Вітрогенератор складається з великої кількості механізмів, надійність кожного з яких залежить від професіоналізму його розробників та виробників.

Вітроустановки потужністю від 5 до 50000 кіловат і вище включають наступні основні підсистеми й вузли:

ротор або лопаті, які перетворюють енергію вітру в енергію обертання валу;

кабіну або гондолу, у якій зазвичай розташований редуктор (деякі турбіни працюють без редуктора), генератор та інші системи;

башта, яка підтримує ротор і кабінку; електричне та електронне обладнання: так само як і панелі керування, електричні кабелі, обладнання заземлення і обладнання для підключення до мережі, система захисту від блискавки та ін.

Діаметр ротора ВЕУ в міру зростання потужності вітроустановки від 1 до 3000 кВт збільшується від 2 до 100 м, а висота башти – від 8 до 100 м. Для вітроустановки потужністю вище 150 кВт діаметр ротора і висота вежі приблизно рівні.

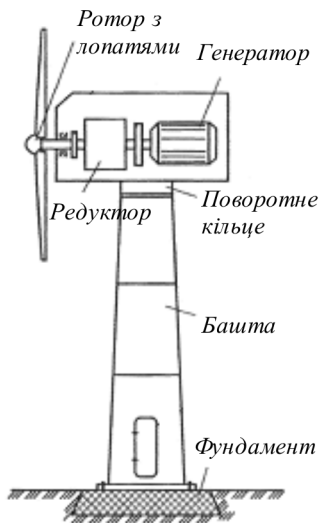


Рис. 1. ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

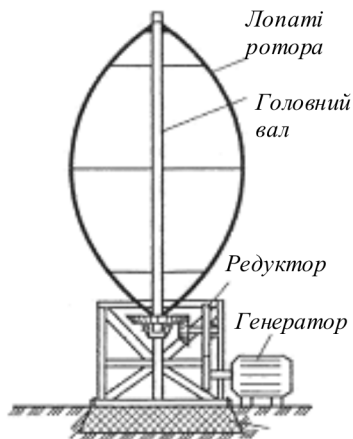


Рис. 2. ВЕУ з вертикальною віссю обертання

Вітротурбіна перетворює кінетичну енергію вітру в електричну за допомогою генератора в процесі обертання ротора. Ротор – це з'єднані разом лопаті. Вони використовуються подібно пропелеру літака для

обертання валу, приєднаного до електричного генератора. За своєю конструкцією генератор вітроенергетичної установки (ВЕУ) нагадує генератори, які використовуються в теплових електростанціях. Винайдено величезну кількість машин для виробництва енергії за рахунок вітру, і багато із них являють собою досить незвичайні конструкції. Зараз існує два основних типи ВЕУ: з горизонтальною віссю обертання (рис. 1) та з вертикальною (рис. 2).

Агрегати з горизонтальною віссю обертання, які мають дві або три лопаті, встановлені на вершині башти, - найпоширеніший тип вітрогенераторів. Розташування провідного валу ротора - частини турбіни, що з'єднує лопать з генератором, - вважається віссю машини. У турбін з горизонтальною віссю обертання провідний вал ротора розташований горизонтально.

У робочому стані відносно напрямку повітряного потоку ротор турбіни може перебувати перед опорою - так званий навітряний ротор або за опорою - підвітряний ротор. Найчастіше турбіни з горизонтальною віссю обертання мають дві або три лопаті, хоча є і моделі з більшим числом лопатей.

Останні являють собою диск з великою кількістю лопатей. Такі установки використовуються в першу чергу як водяні насоси. В турбінах з малою кількістю лопатей площа ротора не є суцільною. Для найбільш ефективної роботи вітрогенератора лопаті повинні максимально взаємодіяти з вітровим потоком, що проходить через площу обертання ротора. ВЕУ з великою кількістю лопатей звичайно працюють при низьких швидкостях обертання, в той час як установки з двома або трьома лопатями повинні обертатися з дуже високою швидкістю, щоб максимально охопити вітрові потоки, що проходять через площу ротора. Теоретично, чим більше лопатей у ротора, тим ефективнішою повинна бути його робота. Вітроенергетичні установки з великою кількістю лопатей менш ефективні за турбіни з двома або трьома лопатями, тому що лопаті створюють перешкоди одна одній.

У турбін з вертикальною віссю обертання (Н-подібні) ведучий вал ротора розташований вертикально (рис. 2). Лопаті такої турбіни - довгі, зазвичай дугоподібні. Вони прикріплені до верхньої і нижньої частин башти. Завдяки вертикальному розташуванню провідного валу ротора Н-подібні турбіни, на відміну від турбін з горизонтальною віссю обертання, "захоплюють" вітер, який дме в будь-якому напрямку, і для цього їм не потрібно змінювати положення ротора при зміні напрямку вітрових потоків. Автором ідей створення турбіни з вертикальною віссю обертання (рис. 2) є французький інженер Дарріус (Darrieus).

Незважаючи на своє зовнішнє розходження, турбіни з вертикальною і горизонтальною осями обертання представляють собою схожі системи. Кінетична енергія вітру, що отримується при взаємодії повітряних потоків з лопатями турбіни, через систему трансмісії передається на електричний генератор. Завдяки трансмісії генератор може працювати ефективно при різних швидкостях вітру. Вироблена електроенергія може використатися напряду, надходячи в електромережу або накопичуватися для більш пізнього використання.

Під час роботи ВЕУ піддаються впливу комбінації навантажень складної природи. Як засвідчує досвід, основними факторами, що впливають на їх працездатність, є динамічні навантаження, які викликані аеродинамічною взаємодією вітрових потоків і рухомих елементів конструкції. Суттєву роль відіграють також відцентрові сили простого обертання ротора та коріолісові сили інерції взаємодії обертального і поворотного руху його елементів. Вони також повинні бути враховані при моделюванні динамічної поведінки системи.

Моделювання вітрових навантажень. Основним фактором силового впливу на елементи конструкції ВЕУ є аеродинамічна взаємодія повітряного потоку і лопаті, що представляє собою джерело генерування електричної енергії. Сили цієї взаємодії розраховуються методом теорії крила [2]. На елемент лопаті довжиною dr і шириною b елементарна сила dP визначається за формулою

$$dP = C_y b dr \rho \frac{W^2}{2}, \quad (1)$$

де: C_y - коефіцієнт підйомної сили крила (лопаті); ρ - масова густина повітря; W - відносна швидкість повітряного потоку, який діє на елемент лопаті; r - відстань елемента лопаті від осі обертання вітроколеса.

Відносна швидкість повітряного потоку

$$W = \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2},$$

де: ωr - колова швидкість елемента лопаті; V - швидкість вітру.

Відповідно

$$dP = C_y b dr \frac{\rho}{2} (\omega^2 r^2 + V^2). \quad (2)$$

Вважаючи $C_y b$ сталими по довжині крила та інтегруючи, отримаємо повне навантаження на крило:

$$P = C_y b \frac{\rho}{2} \int_{r_0}^R (\omega^2 r^2 + V^2) dr = C_y b \frac{\rho}{2} \left[\frac{\omega^2}{3} (R^3 - r_0^3) + V^2 (R - r_0) \right]. \quad (3)$$

Виносимо за дужку $(R - r_0)$, отримуємо

$$P = C_y b \frac{\rho}{2} (R - r_0) \left[\omega^2 \frac{R^2 + R r_0 + r_0^2}{3} + V^2 \right]. \quad (4)$$

Вводимо позначення:

$$\begin{aligned} b(R - r_0) &= S \text{ - площа лопаті (крила);} \\ \frac{R^2 + R r_0 + r_0^2}{3} &= r_m^2 \text{ - умовний радіус крила.} \end{aligned} \quad (5)$$

Підставляючи S і r_m у рівняння (4), отримуємо повне навантаження на крило

$$P = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2). \quad (6)$$

В моменти поривів вітру з великими швидкостями, до яких вітроколесо не відразу може пристосуватися, крила можуть бути перевантажені. Відношення можливого максимального навантаження крила P_{\max} , що виникає при поривах вітру, до робочого навантаження при розрахунковій швидкості вітру P_p називається коефіцієнтом перевантаження.

$$n = P_{\max} / P_p. \quad (7)$$

Позначимо швидкість вітру при пориві через V_n і запишемо рівняння навантаження на крило при V і V_n

$$P = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2), \quad (8)$$

$$P = C_{yn} S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V_n^2), \quad (9)$$

де C_{yn} - коефіцієнт підйомної сили при пориві вітру.

Під час повороту гондоли навколо осі башти $z' - z'$ на крилах вітрового колеса, що обертається, виникають, крім аеродинамічних сил,

відцентрові сили і гіроскопічні сили. Взявши точку A з масою m на лопаті, запишемо вирази цих сил:

$Q = m\omega^2 r$ - відцентрова сила, що виникає внаслідок обертання вітроколеса навколо своєї осі;

$Q_1 = m\omega_1^2 l$ - відцентрова сила, що виникає при повороті гондоли навколо осі $z' - z'$. Сила від поворотного прискорення Кориоліса

$$P = 2m\omega_1 U \sin \beta_1,$$

де l - відстань точки A від осі $z' - z'$. Сила Q_1 напрямлена від осі $z' - z'$ паралельно l ; $U = \omega r$ - відносна швидкість, в даному випадку рівна коловій швидкості обертання точки A навколо осі $X - X$. Напрямок сили P перпендикулярний відносно швидкості U і осі обертання всієї системи $z' - z'$. Кут β_1 - кут між швидкістю U і віссю $z' - z'$. Ці сили діють вздовж осей OX , OY , OZ і викликають моменти M_x , M_y і M_z .

Повний момент у тупки, дорівнює [2]

$$M_z = 2I\omega\omega_1 \sin \omega t,$$

де I - момент інерції крила відносно осі OX .

Розрахунковий момент (максимальний), якщо лопать розташована вертикально

$$M_z = 2I\omega\omega_1.$$

Вал згинається гіроскопічним моментом всього вітроколеса. Він знаходиться додаванням моментів від всіх лопатей

$$M_y = I_0\omega\omega_1,$$

де I_0 - момент інерції всього вітрового колеса відносно осі OX .

Для двохлопатевого вітряка

$$M_y = 2I_0\omega\omega_1.$$

Кутову швидкість ω знаходимо за допомогою рівності

$$\omega = \pi n / 30,$$

де n - число обертів вітряного колеса за хвилину.

Зазначимо, що розрахунок динамічної поведінки ВЕУ під дією розглянутих навантажень повинен проводитися з урахуванням

попереднього напруження їх конструкцій відцентровими силами інерції, які впливають на їх жорсткість.

Коріолісові сили інерції складного обертання ротора. Як показано в [5-7], одним з найнебезпечніших видів навантажень, що діють на лопать, є гіроскопічна сила інерції, викликана її складним обертанням. Такий вид навантаження реалізується, коли під дією вітрового потоку, що змінює свій напрямок, вісь ротора повертається, і лопать починає обертатися відносно двох осей одночасно. Тоді на елемент лопаті довжиною dr діє періодична сила

$$dF = 2r\omega\omega_0 \sin \omega t \gamma dr . \quad (14)$$

Тут γ - погонна густина лопаті, r - відстань від осі обертання ротора до елемента, що розглядається.

При наближенні частоти ω дії періодичної сили (14) до частоти власних коливань лопаті виникають резонансні ефекти. Збуджені ними коливання через втулку лопаті передаються і на башту, тому вони можуть приводити до руйнування не тільки лопатей, але й всієї конструкції.

В підсумку відмітимо, що в роботі проведений аналіз основних факторів, які впливають на динамічну поведінку і міцність вітроенергетичних установок. Тому при розрахунках конструкцій ВЕУ необхідно враховувати їх попереднє напруження силами інерції і гіроскопічну взаємодію обертальних та лінійних видів руху. Можна вважати, що найбільш ефективним для розв'язання цієї задачі є метод скінченних елементів.

1. Андрианов В.Н. Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К. П., Секторов В. Р. Ветроэлектрические станции. – Москва, ГЭИ, 1960. – 323 с.
2. Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки. – Москва, ОГИЗ, 1948. – 542 с.
3. Шефтер Я. И. Рождественский И. В. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты. – Москва, «КОЛОС», 1967. – 376 с.
4. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки. – Москва, ГНУ ВИЭСХ. 2006. – 273 с.
5. Гуляев В. И., Соловьев И.Л., Худолій С.Н. Прецессионные колебания двухлопастного ротора с упругим невесомым валом при сложном вращении.//Проблемы прочности. – 2002. – №2. – С. 73 – 81.
6. Гуляев В. И., Худолій С.Н. Колебания криволинейных закрученных лопастей при сложном вращении.// Прикладная механика. – 2005. – 41, №4. – С. 126 – 132.
7. Гайдайчук В. В., Худолій С.Н. Резонансные колебания упругих лопастей при сложном вращении. // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – №6(38). – С. 54 – 57.