

УДК 621.5

О.А. ГУЛІВЕЦЬ, канд. техн. наук, доц., С.Ю. ОЛІЙНИК, асистент, Р.А. ІЛЬЧЕНКО, студент
Криворізький національний університет

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВОГО ПОТОКУ І ПАРАМЕТРІВ РОТОРА ВІТРОДВИГУНА НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ

Мета. Мета дослідження – установити у загальному виді залежності енергетичних параметрів горизонтально-осьових і вертикально-осьових вітровагунів від параметрів вітрового потоку та параметрів їх роторів.

Методи дослідження. Метод дослідження – аналітичний.

Наукова новизна. Установлені в загальному виді залежності енергетичних параметрів горизонтально-осьових та вертикально-осьових вітровагунів від параметрів вітрового потоку і параметрів роторів вітровагунів.

Практична значимість. Установлені залежності необхідні для визначення критеріїв подібності робочих процесів натурних зразків вітровагунів та їх фізичних моделей і ефективного проведення експериментальних досліджень на їх фізичних моделях.

Результати. Аналізом процесу обтікання вітровим потоком лопатей горизонтально-осьового та вертикально-осьового ВД установлено, що його основний параметр – потужність P_p є функцією параметрів вітрового потоку та параметрів ВД: швидкості вітру v , густини ρ та кінематичної в'язкості ν повітря, коефіцієнта підйомної сили C_y , коефіцієнта сили лобового опору C_x , коефіцієнта бокової сили C_z , коефіцієнта сили тиску на тильний бік лопаті при обертанні вертикально-осьового ротора C_q , коефіцієнта сили лобового тиску на траверсу вертикально-осьового ротора C_{xT} , діаметра ротора D , довжини лопаті l , хорди лопаті b , кута установки лопаті β , кута атаки α , площі лопаті S_A , площі обмаху ротора S_p , кількості лопатей n , кутової швидкості ротора ω , шорсткості поверхонь лопаті R_z .

Крім потужності важливою характеристикою ВЕУ є пускова швидкість вітру ВД v_n , від якої залежить також кількість електричної енергії, яку виробляє установка за рік, крім названих параметрів залежить і від моментів інерції ротора ВД I_p та момента інерції ротора електричного генератора I_g .

На основі детального аналізу процесу обтікання вітровим потоком лопатей роторів горизонтально-осьового та вертикально-осьового вітровагунів установлені в загальному виді залежності потужності та пускової швидкості вітровагунів від параметрів вітрового потоку та параметрів їх роторів. Одержані залежності необхідні для визначення критеріїв подібності робочих процесів натурних зразків вітровагунів і їх фізичних моделей та для вибору раціональних параметрів вітровагунів.

Ключові слова: вітровий потік, вітроелектрична установка, вітровагун, ротор, лопать, аеродинаміка.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Одним із напрямків вирішення енергетичної проблеми України є створення та застосування високоефективних вітроелектричних установок (ВЕУ) малої потужності, які могли б бути використані для автономного енергозабезпечення об'єктів невеликої потужності.

Створення високоефективних ВЕУ малої потужності неможливе без глибокого аналізу процесу обтікання вітровим потоком робочих органів вітровагунів (ВД) різних конструкцій.

Аналіз досліджень і публікацій. Вивченню процесу обтікання вітровим потоком робочих органів вітровагунів присвячені роботи ряду авторів: Н.Е. Жуковський, В.П. Ветчинкін, Г.Х. Сабінін, Е.М. Фатеев, Я.І. Шефтер та ряд інших [1 – 6]. Але із-за складнощів цього процесу (різка зміна напрямку і швидкості вітрового потоку, його фізичних характеристик, різноманітність конструктивних виконань робочих органів ВД, складність самого процесу обтікання) це питання ще недостатньо вивчене.

Постановка задачі. Виконати аналіз процесу обтікання вітровим потоком лопатей вітровагунів та установити в загальному виді залежності їх енергетичних параметрів від параметрів вітрового потоку та параметрів їх роторів.

Викладення матеріалу та результати. При обтіканні вітровим потоком лопатей ротора вітровагуна для створення обертального момента на його валу можуть використовуватись:

ефект опору вітровому потоку (карусельні і чашкові ротори та горизонтально-осьові з плоскими лопатями);

різниця сил тиску вітрового потоку на випуклу та угнуту поверхню лопатей (ротор Савоніуса), які виконані у формі циліндричних сегментів (коефіцієнт аеродинамічного опору випуклої поверхні $C_x=0,34$, а угнутої $C_x=1,3$) [1];

ефект виникнення підйомної сили на лопатях аеродинамічного профілю, які обертаються навколо осі ротора і зорієнтовані під певним кутом до напрямку вітрового потоку (горизонтально-осьові з лопатями аеродинамічного профілю, ротори Дар'є та комбіновані ротори Дар'є-Савоніуса).

Профіль поперечного перерізу лопаті, що має витягнуту форму вздовж потоку, округлену до потоку передню і гостру задню кромку, називається криловим профілем.

Внаслідок дії вітрового потоку на лопаті ротора на них виникає сила аеродинамічного тиску \bar{F}_q , складовими якої на лопатях з аеродинамічним профілем є підйомна сила Y , лобового опору X та бокова сила профілю Z (рис. 1, а):

$$Y = C_y \cdot \frac{\rho v_\Sigma^2}{2} \cdot S_\Lambda; \quad X = C_x \cdot \frac{\rho v_\Sigma^2}{2} \cdot S_\Lambda; \quad Z = C_z \cdot \frac{\rho v_\Sigma^2}{2} \cdot S_\Lambda,$$

де ρ – густина повітря; v_Σ – швидкість набігаючого на лопать потоку; S_Λ – площа лопаті; C_x , C_y , C_z – аеродинамічні коефіцієнти відповідно підйомної сили, лобового опору та бічної сили при обтіканні набігаючим потоком лопаті з аеродинамічним профілем.

Основна частина підйомної сили на лопатях ВД створюється за рахунок розрідження над аеродинамічним профілем.

Швидкість набігання вітрового потоку v_Σ є векторною сумою швидкості вітру та колової швидкості певного елемента лопаті v_Λ

$$v_\Sigma = \sqrt{v_g^2 + v_\Lambda^2}.$$

Значення колової швидкості певного елемента лопаті, який знаходиться на відстані r від осі ротора

$$v_\Lambda = \omega \cdot r,$$

де ω – кутова швидкість ротора.

Для точок кінця лопаті

$$v_\Lambda = \omega \cdot R,$$

де R – радіус ротора.

Якщо розглянути елемент лопаті горизонтально-осьового ротора довжиною dl , площа якого буде $dS = b \cdot dl$, то на нього будуть діяти: підйомна сила

$$dY = C_y \cdot \frac{\rho v_\Sigma^2}{2} \cdot dS$$

та сила лобового опору

$$dX = C_x \cdot \frac{\rho v_\Sigma^2}{2} \cdot dS.$$

Спроекувавши значення сил, що діють на елемент лопаті ротора, на площину його обертання і помноживши на відстань цього елемента від осі обертання та проінтегрувавши вздовж осі лопаті одержимо величину обертового моменту на валу ротора, який створюється силами, які виникають при обтіканні набігаючим потоком однієї лопаті.

Добуток величини обертового моменту на кутову швидкість ротора визначає його потужність. Аеродинамічні коефіцієнти C_x , C_y , C_z в свою чергу залежать від геометрії профілю лопаті і кута атаки α – кута між вектором набігаючого потоку і хордою профілю лопаті (лінією, що з'єднує носок та задню кромку профілю лопаті) (рис. 2).

Аеродинамічні коефіцієнти є абстрактними числами, які визначаються при продувці моделей в аеродинамічних трубах і використовуються при визначенні відповідних сил, що виникають при обтіканні вітровим потоком лопатей з аеродинамічним профілем натурних об'єктів (роторів вітрогенераторів, крил літаків, повітряних гвинтів). Наприклад, для аеродинамічного профілю [4] при куті атаки $\alpha=5^\circ$ коефіцієнти $C_y=0,35$; $C_x=0,02$; $C_y/C_x=17,5$, а при куті $\alpha=10^\circ$ – $C_y=0,5$; $C_x=0,05$; $C_y/C_x=10$.

При збільшенні кута атаки підйомна сила збільшується поки не досягне точки зриву потоку, де потік відривається від поверхні профілю в задній його частині. При цьому підйомна сила зменшується, а сила лобового опору швидко зростає.

Аеродинамічний ефект зриву потоку на лопатях зумовлений перетворенням ламінарного обтікання лопаті повітряним потоком в турбулентне (див. рис. 1, б). Це явище може бути наслідком як збільшення швидкості вітру при сталій швидкості обтікання ротора, так і збільшення швидкості обертання ротора при сталій швидкості вітру. Для кожного профілю лопаті необхідно визначати такий кут атаки α , для якого відношення C_y/C_x , яке в аеродинаміці назива-

ється аеродинамічною якістю, буде найбільшим. Знаходження точного значення оптимального кута α є досить складною задачею. Складність цієї задачі в тому, що підйомна сила і сила лобового опору залежать від форми перерізу і від числа Рейнольдса, яке в свою чергу залежить від розміру хорди і швидкості потоку відносно лопаті. Практично всі профілі мають найбільшу аеродинамічну якість C_y/C_x при куті атаки $\alpha=5^\circ$ [4, 7]. Як видно з рис. 2, знаючи швидкість вітрового потоку v_0 і задаючись величиною швидкохідності ротора $Z=\omega R/v_0$ можна визначити кутову швидкість ротора, колову швидкість в поперечних перерізах лопатей ротора, що дозволяє визначити напрям вектора сумарного набігаючого потоку v_Σ та величину кута його нахилу до площини обертання ротора – кута ψ . Знаючи величину кута ψ та кута атаки α можна визначити кут установки лопаті β (кут між лінією хорди профілю лопаті та площиною обертання) в будь-якому її перерізі $\beta = \psi - \alpha$.

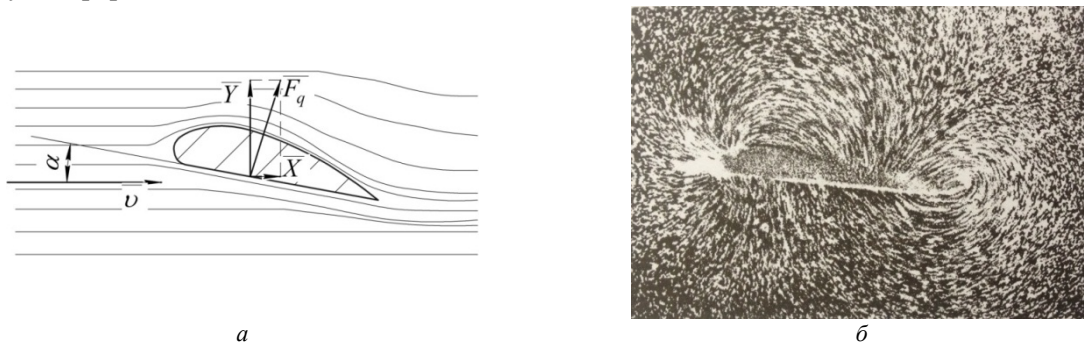


Рис. 1. Обтікання вітровим потоком лопатей з аеродинамічним профілем:

а) – при ламінарному режимі; б) – зрив потоку на верхній поверхні профілю крила [1]

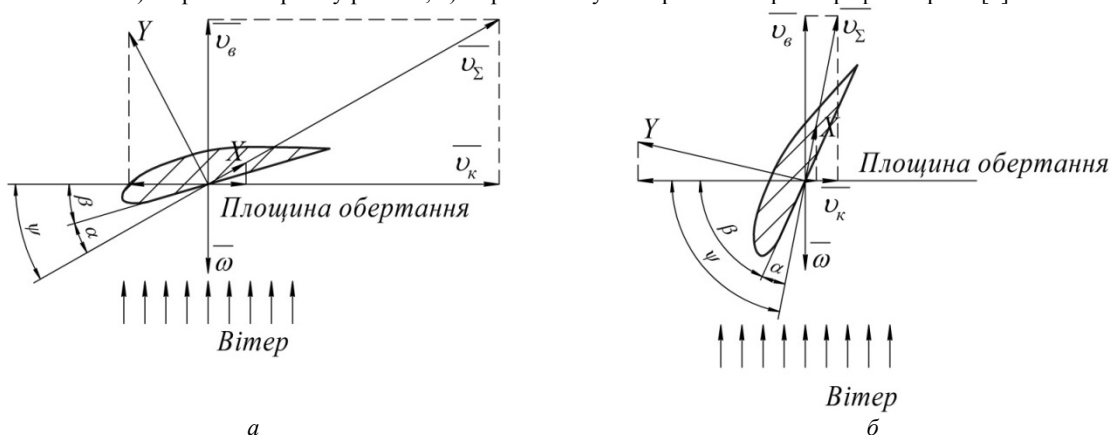


Рис. 2. Взаємодія вітрового потоку з лопатями горизонтально-осьового вітрогенератора:

а) – біля кінця лопаті; б) – біля кріплення лопаті до вала

Так як у горизонтально-осьового ВД значення кута ψ по мірі віддалення поперечних перерізів лопатей від осі обертання внаслідок зростання їх колових швидкостей буде зменшуватись (див. рис. 2), то звідси висновок – лопаті такого вітрогенератора повинні бути закрученими навколо своєю поздовжньої осі.

У вертикально-осьових ВД на відміну від горизонтально-осьових, де обертальний момент на валу ротора створюється одночасно всіма лопатями, обертальний момент створюється лише частиною лопатей залежно від їх положення відносно напрямку вектора набігаючого потоку. При цьому для зменшення опору лопатей, що рухаються назустріч вітровому потоку їх виготовляють випуклими, або прикривають ширмою [1, 10].

При проходженні набігаючого вітрового потоку через площу обмаху ротора S_p (перпендикулярну вітровому потоку площину, в якій рухаються лопаті ротора) основна частина його енергії перетворюється в механічну енергію обертання ротора та приведення в дію електричного генератора. Частина енергії вітрового потоку витрачається на його закручування і подолання сил тертя між частинками вітрового потоку та між частинками вітрового потоку і поверхнями лопатей, а частина енергії залишається в вітровому потоці, який продовжує рухатись після проходження через площу обмаху ротора. Частина вітрового потоку не взаємодіючи з лопатями

може обтікати площу обмаху ротора при великому значенні коефіцієнта швидкості Z та коефіцієнті заповнення площі обмаху ротора

$$i = \frac{nS_{\Lambda}}{S_p},$$

де n – кількість лопатей ротора; S_{Λ} – площа лопаті.

Загальноприйнятим критерієм аеродинамічної ефективності роторів є коефіцієнт використання енергії вітру або коефіцієнт потужності C_p .

Коефіцієнт використання енергії вітру визначається як відношення потужності ротора до розрахункової потужності вітрового потоку, який проходить через площу обмаху ротора [1], і показує, яку частину кінетичної енергії вітрового потоку ротор перетворює в енергію обертання вала

$$C_p = \frac{P_p}{P_g},$$

де: $P_p = F_q(v - v_1)$ – потужність ротора (енергія вітрового потоку, яка перетворена ротором в енергію обертання вала); F_q – сила тиску вітрового потоку; v – швидкість набігаючого вітрового потоку; v_1 – швидкість вітрового потоку за ротором; $P_g = \rho \cdot S_p \cdot v^3 / 2$ – потужність вітрового потоку перед ротором; ρ – густина повітря; S_p – площа обмаху ротора.

Максимальна теоретична границя величини коефіцієнта C_p для роторів, які використовують ефект виникнення підйомної сили на лопатях аеродинамічного профілю (горизонтально-осьові ротори і ротори Дар'є), називається границею Бетца $C_{p\max} = 0,593$.

Для роторів, робота яких ґрунтується на застосуванні принципу тиску вітрового потоку на лопаті (ротор Савоніуса, карусельні, чашкові) коефіцієнт використання енергії вітру визначається за формулою

$$C_p = \frac{4}{27} \cdot C_q,$$

де: C_q – коефіцієнт тиску.

В реальних вітроустановках коефіцієнт використання енергії вітру завжди є меншим від свого максимального теоретичного значення із-за ряду причин.

По-перше, на величину коефіцієнта C_p впливають ряд параметрів роторів, основними з яких є:

- аеродинамічні коефіцієнти профілів: C_x, C_y, C_z ;
- відношення довжини лопаті до діаметра ротора l/D ;
- коефіцієнт заповнення площі обмаху ротора i ;
- кутова швидкість обертання ротора ω ;
- кут установки лопатей β ;
- шорсткість обробки поверхонь лопатей Rz ;
- форма лопаті в плані;
- крутка лопаті;
- звуження лопаті;
- форма торців лопаті;
- кількість і форма траверс (для роторів Дар'є);
- зазор між лопатями (для роторів Савоніуса).

По-друге, в реальних конструкціях є втрати енергії на тертя між поверхнями лопаті і вітровим потоком.

Втретє, в роторах Дар'є джерелом аеродинамічних втрат є траверси, на яких установлюються лопаті (аеродинамічний коефіцієнт лобового опору циліндричної траверси $C_x^u = 0,35 - 0,45$, а траверси з аеродинамічним профілем $C_x^a = 0,05 - 0,08$ [1]).

На ефективність взаємодії лопатей ротора з вітровим потоком впливає також і частота його обертання:

при малій частоті обертання частина вітрового потоку проходить не встигаючи взаємодіяти з лопатями;

при оптимальній частоті обертання весь вітровий потік взаємодіє з лопатями ротора;

при великій частоті обертання відбувається турбулізація потоку, внаслідок чого частина енергії розсіюється.

Крім цього, є принципіальні особливості роторів, які знижують їх аеродинамічні особливості. Для горизонтально-осьових роторів – це запізнення системи орієнтації на майже постійно змінний напрям вітрового потоку, що приводить до неспівпадання положення нормалі до площини вітрового колеса з напрямом вітрового потоку, а при відсутності крутки лопатей навколо їх осі виникають різні енергетичні стани на їх ділянках вздовж осі із-за різниці їх колових швидкостей і кутів атаки. Для вертикально-осьових роторів із-за нерівномірності обертальної сили, що діє на лопать при її русі по колу, приводить до нерівномірності обертання ротора в межах одного оберту.

Потужність на валу ротора залежить і від алгоритму управління. При роботі ротора з постійною швидкістю обертання максимальне значення коефіцієнта використання енергії вітру досягаються лише в певному діапазоні швидкостей вітру, а при роботі ротора зі змінною швидкістю – в всьому діапазоні швидкостей вітру, але з втратами потужності із-за інерціальності системи регулювання вітроустановки.

Крім потужності важливою характеристикою ВЕУ є пускова швидкість вітру v_n , від якої також залежить кількість електричної енергії, яку виробляє установка за рік. Пускова швидкість вітру залежить від тих же параметрів, що і потужність, а крім того на її величину впливають моменти інерції ротора I_P та генератора ВЕУ.

На основі аналізу обтікання вітровим потоком лопатей з аеродинамічним профілем можна записати в загальному виді залежності основних експлуатаційних характеристик (потужності та пускової швидкості) як функцій параметрів ротора ВД та параметрів вітрового потоку:

для горизонтально-осьового вітродвигуна

$$P_{Pz} = f_1(v, \rho, v, C_y, C_x, C_z, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, \omega, R_z);$$

$$v_{n2} = f_3(v, \rho, v, C_y, C_x, C_z, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, R_z, I_P, I_2);$$

для вертикально-осьового вітродвигуна

$$P_{Pz} = f_2(v, \rho, v, C_y, C_x, C_z, C_q, C_{xT}, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, \omega, R_z);$$

$$v_{n2} = f_4(v, \rho, v, C_y, C_x, C_z, C_q, C_{xT}, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, R_z, I_P, I_2).$$

Висновки. Обтікання вітровим потоком лопатей роторів ВД ВЕУ є складним аеродинамічним процесом.

Установлені в загальному виді залежності потужності та пускової швидкості вітродвигунів від параметрів їх роторів, які необхідні для визначення критеріїв подібності робочих процесів натурних зразків ВД та їх фізичних моделей і визначення раціональних значень їх параметрів.

При створенні нових високоефективних конструкцій ВД ВЕУ малої потужності для визначення раціональних значень їх параметрів доцільно застосовувати крім математичного і фізичне їх моделювання.

Список літератури

1. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановки малой мощности. Киев: Издательство «Наукова думка» НАН України, 2011. – 592 с.
2. Преобразование и использование ветровой энергии / Денисенко О.П., Козловский Г.А., Федосенко А.П. и др. – К.: Техніка, 1992. – 176 с.
3. Шефтер Я.И. Ветроэнергетические агрегаты. – М.: Машиностроение, 1972. – 285 с.
4. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев – М.: ОГИЗ – Сельхозгиз, 1948. – 544 с.
5. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С., Гнатишин Я.М. Нетрадиційна енергетика: Основи теорії та задачі: Навч. посіб. – Львів: «Магнолія 2006», 2009. – 188 с.
6. Ветроэнергетика Новейшие разработки / Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 270 с.
7. Расчет лопастей для ветряков. Интернет-ресурс: [rosinmn.ru/VETRO...blade Deign.htm](http://rosinmn.ru/VETRO...blade%20Deign.htm).
8. М.Н. Розин. – Об оптимальном угле атаки пропеллерного ветряка. Интернет-ресурс: master.donntu.org/2012...8/index.htm.
9. Немного о теории работы ветродвигателей. Интернет-ресурс: energi.ru/...vetrodvigatelj.html.
10. Аэродинамика вертикально-осевого ветродвигателя. Интернет-ресурс: helpiks.org/7-86050.html.

Рукопис подано до редакції 23.02.17