

Схема вітрогенератора з використанням сопла

Використання вітрогенераторів цієї конструкції у фермерських господарствах для привода як електричних генераторів, так і для водяних насосів дасть змогу заощаджувати електричну енергію.

1. Адаменко О., Височанський В., Лютко В., Михайлів М. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії. - Івано-Франківськ, 2000. 2. Соловей О.І., Праховник А.В., Іншеков Є.М., Васильченко Г.М., Конеченков А.Є., Дешко В.І. Від виробництва до ефективного споживання енергії. - К. 1999.

УДК 621.548

М.Б. Кудлик, І.С. Лозовий*

кафедра нарисної геометрії та графіки, *кафедра теоретичної механіки
Національний університет "Львівська політехніка"

ВПЛИВ ПРОФІЛЮ ЛОПАТИ ТИХОХІДНОГО ВІТРОКОЛЕСА, ОРІЄНТАЦІЇ ТА ШВИДКОСТІ ЙОГО ОБЕРТАННЯ ТА ВІДБІР НИМ ПОТУЖНОСТІ З ПОТОКУ ПОВІТРЯ

© Кудлик М., Лозовий І. *, 2002

Сформульовано задачу оптимізації швидкості обертання тихохідного вітроколеса та профілю його лопатей за критерієм максимально можливого відбору потужності зі слабких потоків повітря. Запропоновано спосіб визначення необхідних кутів власних поворотів лопатей та осі обертання валу вітроколеса при надмірних швидкостях потоку повітря для збереження номінальної потужності вітроенергетичної установки.

The task of optimizing velocity rotation of low-speed wind-wheel and profile of its paddles according to criterion at most possible selection of power from weak air flow is set and worked out in the article. The method of determination the necessary angles of own turn of paddles and axis of rotation of wide-wheel shaft with higher speed of air flow with the aim of support nominal capacity of wide-power installation is suggested.

Як показано в [2], для фермерських господарств, що починають діяти в Україні, найнеобхідніші дешеві тихохідні ВЕУ максимальної одиничної потужності в межах 3–5 кВт.

Зазвичай максимальну проектну потужність ВЕУ, розміри вітроколеса (ВК), геометрію його лопатей прийнято визначати для деякої стандартної для певних регіонів земної кулі швидкості потоку повітря (ПП). Так, для північних регіонів значення цієї швидкості приймається таким, що дорівнює 12 м/с, що відповідає шести балам за шкалою Бофорта для сили ПП. В країнах континентальної Європи, США за стандартне значення швидкості ПП приймають 7,5 м/с, що відповідає силі ПП в чотири бали за шкалою Бофорта.

Значення стандартної швидкості ПП пов'язують зі значеннями середньорічних швидкостей ПП в регіоні. Тому, з огляду на результати багаторічних метеорологічних спостережень на теренах України [3], правомірно вважати, що розміри ВК, геометрія його лопатей, проектна потужність ВЕУ, які передбачається експлуатувати в її межах, повинні визначатися для швидкостей ПП 3-5 м/с і ці швидкості для переважної більшості регіонів України прийматися як стандартні. Вони відповідають трибальній силі ПП за шкалою Бофорта.

У [4] отримана залежність, що дає змогу визначати потужність d^2N_{z,l_z} , яку відбирає ділянка лопаті елементарної площі $dl_z \cdot dz$ тихохідного вітроколеса (ВК) з горизонтальною віссю обертання з горизонтального потоку повітря (див. рисунок). Вона має вигляд:

$$d^2N_{z,l_z} = A_1 \frac{d\varphi}{dt} z \cos \alpha_{z,l_z} V_n \left(A_2 + A_3 l_z \frac{d\alpha_z}{dz} \right) \cdot \left\{ V_n \left(A_2 \cos \alpha_{z,l_z} + A_3 \sin \alpha_{z,l_z} \right) - \frac{d\beta}{dt} l_z \cos \alpha_{z,l_z} - \left[- \frac{d\varphi}{dt} \left[z \sin(\alpha_z + \beta) \cos \alpha_{z,l_z} + l_z \cos(\alpha_z + \beta) \sin \alpha_{z,l_z} \right] \right\} \cdot dl_z dz, \quad (1)$$

де $A_1 = \rho_n \sin(\alpha_z + \beta)$; $A_2 = \cos \alpha \cos(\alpha_z + \beta) + \sin \alpha \cos \varphi \sin(\alpha_z + \beta)$; $A_3 = \sin \alpha \sin \varphi$; ρ_n , V_n –

питома маса та швидкість горизонтального потоку повітря, що набігає на лопать; α_z – кут

профілю лопаті на відстані z від осі обертання ВК; $\frac{d\alpha_z}{dz}$ – швидкість зміни кута профілю зі

зміною відстані до осі обертання ВК; β , $\frac{d\beta}{dt}$ – кут та швидкість повороту самої лопаті навколо власної осі обертання (навколо маху); α – кут між вектором швидкості потоку повітря та віссю обертання ВК; φ , $\frac{d\varphi}{dt}$ – кут повороту та кутова швидкість обертання ВК; l_z – відстань між віссю власного обертання лопаті та центром виділеної ділянки елементарної площі $dz \cdot dl_z$; α_{z,l_z} – кут між нормаллю до виділеної ділянки лопаті елементарної площі $dz \cdot dl_z$ та горизонтальною площиною.

Залежність (1) коректно описує відбір потужності ділянкою лопаті елементарної площі ВК з горизонтальною віссю обертання від горизонтального потоку повітря при їх довільних відносній орієнтації, кутах профілю лопаті та швидкості обертання ВК. Водночас одним з найважливіших завдань є забезпечення максимально можливого відбору потужності зі слабких за потужністю потоків повітря. У такому разі у будь-який спосіб необхідно

забезпечити перпендикулярність вектора потоку повітря до площини розташування ВК (тобто, $\alpha = 0$). Крім цього, лопаті розташовують так, щоби площа перекриття вітрового колеса була максимальною (тобто, $\beta = 0$ та $\frac{d\beta}{dt} = 0$). Як правило, для поширених типів профілів лопатей тихохідних ВК значення $\alpha_{z,1z}$ мале, тому допустимо вважати, що $\cos \alpha_{z,1z} \cong 1$,

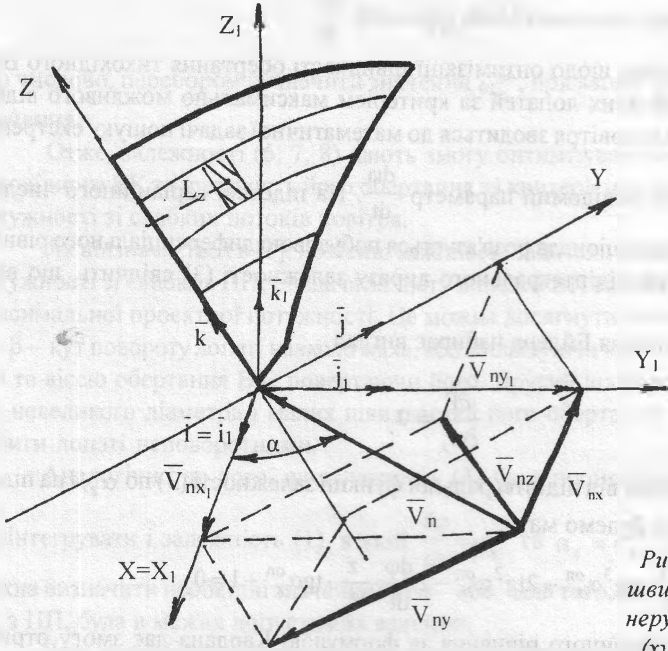


Рис. Компоненти вектора швидкості потоку повітря в нерухомій (x_1, y_1, z_1) та рухомій (xyz) системах координат

а $\sin \alpha_{z,1z} \cong 0$. Довжину dl_z ділянки лопаті елементарної площі $dz \cdot dl_z$ можна представити як $z d\psi$, де ψ – центральний кут ВК. Тихохідні ВК відрізняються від швидкохідних ВК (кількість лопатей яких рідко перевищує три) великою кількістю лопатей (18-24), які практично повністю перекривають собою всю площу ВК. Тому інтегрувати залежність (1) по ψ доцільно в межах від "0" до "2 π ". Тоді потужність, що відбирають з потоку повітря всі лопаті смужкою елементарної висоти dz , яка розташована на відстані z від осі обертання ВК, дорівнює:

$$dN_z = 2\pi\rho z^2 \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha_z V_n \cos \alpha_z \left(V_n \cos \alpha_z - \frac{d\varphi}{dt} z \sin \alpha_z \right) dz. \quad (2)$$

Потужність, яку відбирає ВК загалом з потоку повітря, дорівнює:

$$N = 2\pi\rho_n \int_{R_B}^{R_3} z^2 \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha_z V_n \cos \alpha_z \left(V_n \cos \alpha_z - \frac{d\varphi}{dt} z \sin \alpha_z \right) dz, \quad (3)$$

де R_B, R_3 – внутрішній та зовнішній радіуси ВК.

При відомих швидкості горизонтального потоку повітря V_n , його питомій масі ρ_n , вибраних розмірах ВК - R_B, R_3 потужність, яку відбирає ВК з потоку, залежить від кутової швидкості вітрового колеса $\frac{d\varphi}{dt}$, яку можна розглядати як невідомий параметр, та кута профілю

лопаті α_z , який можна розглядати як невідому функцію від поточного значення радіуса z . Це дає змогу залежність (3) розглядати як функціонал з невідомим параметром виду:

$$N = \int_{R_B}^{R_3} F\left(z, \alpha_z, \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)\right) dz, \quad (4)$$

де внутрішніми дужками виділено невідомий параметр $\frac{d\varphi}{dt}$.

Отже, завдання механіки щодо оптимізації швидкості обертання тихохідного ВК та профільного кута його лінійчатих лопатей за критерієм максимально можливого відбору потужності зі слабких потоків повітря зводиться до математичної задачі пошуку екстремуму функціонала (4), що містить невідомий параметр $\frac{d\varphi}{dt}$. На підставі варіаційного числення задача пошуку екстремуму функціонала розв'язується побудовою диференціального рівняння Ейлера [5]. Аналіз структури підінтегрального виразу залежності (3) свідчить, що він не залежить від $\frac{d\alpha_z}{dz}$. Тоді рівняння Ейлера набирає вигляд

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_z} = 0. \quad (5)$$

Беручи часткову похідну від підінтегральної функції залежності (3) по α_z , і на підставі (5), прирівнюючи її до нуля, будемо мати:

$$\frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{z}{V_n} \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha_z^{\text{on}} - 2 \operatorname{tg}^2 \alpha_z^{\text{on}} - 2 \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{z}{V_n} \cdot \operatorname{tg} \alpha_z^{\text{on}} + 1 = 0.$$

Розв'язок цього алгебраїчного рівняння за формулою Кардана дає змогу отримати залежність оптимального кута α_z^{on} профілю лопаті від її поточного радіуса z :

$$\operatorname{tg} \alpha_z^{\text{on}} = \pm 2 \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} k^2 + 1 \right)} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left[\frac{\frac{1}{6} k \left(\frac{16}{9} k^2 + 1 \right)}{\sqrt{\frac{64}{729} k^6 + \frac{32}{81} k^4 + \frac{16}{27} k^2 + \frac{8}{27}}} \right] \pm \frac{+0}{\pm \frac{2}{3} \pi} \right] + \frac{2}{3} k, \quad (6)$$

де $\frac{1}{k} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{z}{V_n}$, в яку швидкість потоку повітря V_n та кутова швидкість обертання ВК

$\frac{d\varphi}{dt}$ входять параметрами.

Підставляючи функцію оптимального кута α_z^{on} профілю лопаті в (3), отримаємо максимальне значення функціонала, тобто, максимальне значення потужності N^{on} , яку може відібрати ВК з лопатями, що мають оптимальний кут профілю α_z^{on} :

$$N^{\text{on}} = 2\pi \rho_n \int_{R_B}^{R_3} z^2 \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha_z^{\text{on}} V_n \cos \alpha_z^{\text{on}} \left(V_n \cos \alpha_z^{\text{on}} - \frac{d\varphi}{dt} z \sin \alpha_z^{\text{on}} \right) dz. \quad (7)$$

Для визначення оптимальної ω_k^{on} кутової швидкості $\frac{d\varphi}{dt}$ обертання ВК необхідно прирівняти до нуля часткову похідну від N^{on} по $\frac{d\varphi}{dt}$, тобто:

$$\frac{\partial N^{on}}{\partial \omega_k^{on}} = 0, \quad (8)$$

або числово, перебором визначити значення ω_k^{on} , при якому N^{on} з (7) набуває максимальне значення.

Отже, залежності (6, 7, 8) дають змогу оптимізувати кут профілю лінійчатої лопаті тихохідного ВК та швидкість його обертання за критерієм максимально можливого відбору потужності зі слабких потоків повітря.

Як відзначається в [1], не менш важливою задачею, ніж відбір максимально можливої потужності зі слабких ПП, є задача захисту лопатей ВК від сильних ПП, відбору з них лише максимальної проектної потужності. Це можна досягнути двома шляхами: або збільшуючи кут β – кут повороту лопаті навколо маха, або збільшуючи кут α – кут між вектором швидкості ПП та віссю обертання ВК, повертаючи його. Другий шлях доцільно використовувати для ВК невеликого діаметра і малих швидкостей його обертання. У такому разі є можливість робити лопаті неповоротними.

Аналогічно до того, як залежність (3) була проінтегрована (залежність 5), можна проінтегрувати і залежність (1), в якій $\frac{d\varphi}{dt} \approx \omega_k^{on}$ та $\alpha_z = \alpha_z^{on}$. Інтегруючи числово, завжди можна визначити необхідні значення кутів або для того, щоб потужність, що відбирається ВК з ПП, була в межах допустимих величин.

Для перевірки правомірності аналітичних підходів, правильності отриманих математичних залежностей був розроблений дев'ятилопатевий макет ВЕУ, та випробуваний в аеродинамічній трубі Національного університету "Львівська політехніка". Результати експериментів показали правомірність прийнятих припущень, та достатню для потреб практики точність результатів отриманих аналітичне.

1. Дж. Твайдел, А. Усїр. *Возобновляемые источники энергии*//Под. ред. В. А. Коробкова. М. 1990. 2. Кудлик М.Б. *Развиток альтернативной энергетики - актуальна задача розбудови України. Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. -2001. -№5. Львів, -с. 285-292.* 3. *Гос. ком. по гидрометеорологии. Украинское республиканское управление по гидрометеорологии. Научно прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 10. Украинская ССР. Книга1, Книга!. Ленинград. Гидрометеоиздат 1990, 420 С.* 4. Лозовий І.С., Кудлик М.Б.. *Моделювання роботи лінійчато-профільованої лопаті вітроколеса з горизонтальною віссю обертання. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции "Современные проблемы геометрического моделирования", часть 2. 4-6 сентября 1997 г. Мелитополь, 1997, с. 96-97.* 5. Л. Я. Цлаф. *Вариационное нечисленне й інтегральніе уравнения. Справочное руководство. М. 1966.*