



МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТИХОХІДНОГО ВІТРОКОЛЕСА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ЛОПАТЯМИ ПОСТІЙНОГО ПРОФІЛЮ ЗА ЙОГО РАДІУСОМ

Роман Зінко ¹⁾, Тарас Круць ²⁾, Ігор Лозовий ¹⁾

¹⁾ Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 32, Львів, 79013, Україна, e-mail: rzinko@polynet.lviv.ua
²⁾ Львівський автодорожній технікум, вул. Личаківська 2, Львів, 79008, Україна

Резюме: в статті поставлено і вирішено завдання оптимізації швидкості обертання тихохідного вітроколеса і оптимального профілю його лопатей згідно критерію отримання максимальної енергії від слабого потоку повітря. Запропоновано метод визначення необхідних кутів власного нахилу лопатей і осі вітроколеса з вищою швидкістю потоку повітря для підтримки номінальної потужності енергетичної установки.

Ключові слова: тихохідне вітроколесо, оптимальний профіль лопатей.

1. ВСТУП

Вітроенергетика сьогодні має свої усталені традиції у розвитку енергетики [1]. На сьогодні для фермерських господарств, що починають діяти на теренах України найбільш необхідні дешеві вітроенергетичні установки (ВЕУ) максимальної одиничної потужності в межах 3-6 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 рівним 12 м/с, що відповідає шести балам по шкалі Бофорта. В країнах континентальної Європи, США за стандартне значення швидкості ПП приймають 7,5 м/с, що відповідає силі ПП в чотири бали по шкалі Бофорта.

Значення стандартної швидкості ПП пов'язують зі значеннями середньорічних швидкостей ПП в даному регіоні. Тому, з огляду на результати багаторічних метеорологічних спостережень на теренах України [2], правомірно вважати, що розміри ВК, геометрія його лопатей, проектна потужність ВЕУ, які передбачається експлуатувати в її межах, повинні визначитися для швидкостей ПП 3-5 м/с і ці швидкості для переважної більшості регіонів України прийматися як стандартні. Вони відповідають

трибальній силі ПП по шкалі Бофорта.

Малі швидкості ПП не дозволяють ефективно працювати лопатям, профіль яких базується на ефектах аеродинаміки. Тому в цих випадках представляється за доцільне використовувати лопаті з профілем який базується на ефектах вітрила розвертання вектора швидкості ПП при його безпосередньому контакті з робочою поверхнею лопаті. Для створення рушійної сили лопать повинна обертатися не скоріше ПП який попадає на елементарні її площинки. Оскільки швидкість ПП мала тому і вітроколесо для роботи в таких ПП називають тихохідним вітроколесом (ТВК).

Дослідженню роботи ТВК з прямолінійною твірною робочої поверхні лопаті присвячені роботи [3-5]. Прямолінійність твірної значно спрощує технологію виготовлення лопаті, що значно впливає на показник вартості одиниці встановленої потужності ВЕУ. Але для ВЕУ невеликої потужності цей вплив зменшується.

В роботах [3-5] серед іншого покладається, що ВК має велику кількість лопатей (24 та більше). Це дозволило авторам цих робіт визначити оптимальну орієнтацію елементарної площини лопаті лише в місці розташування її маху, зберігаючи цю орієнтацію по всій прямолінійній ширині елементу лопаті. При цьому віддалі точок виділеної елементарної полоски лопаті від осі обертання ВК різнилися між собою незначно, тому що кількість лопатей була велика. Зменшення кількості лопатей ВК до

9-12 збільшує ці різниці. Тому вздовж радіуса кінцеві частини лопаті з прямолінійною твірною її робочої поверхні мають не оптимальну орієнтацію.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

З метою збільшення коефіцієнта корисної дії ВК пропонується лопать [6], в якій оптимальна орієнтація її елементів підтримується не лише в місці розташування маху (рис.1), але і на всьому колі довільного проміжкового радіусу ВК (рис.2).

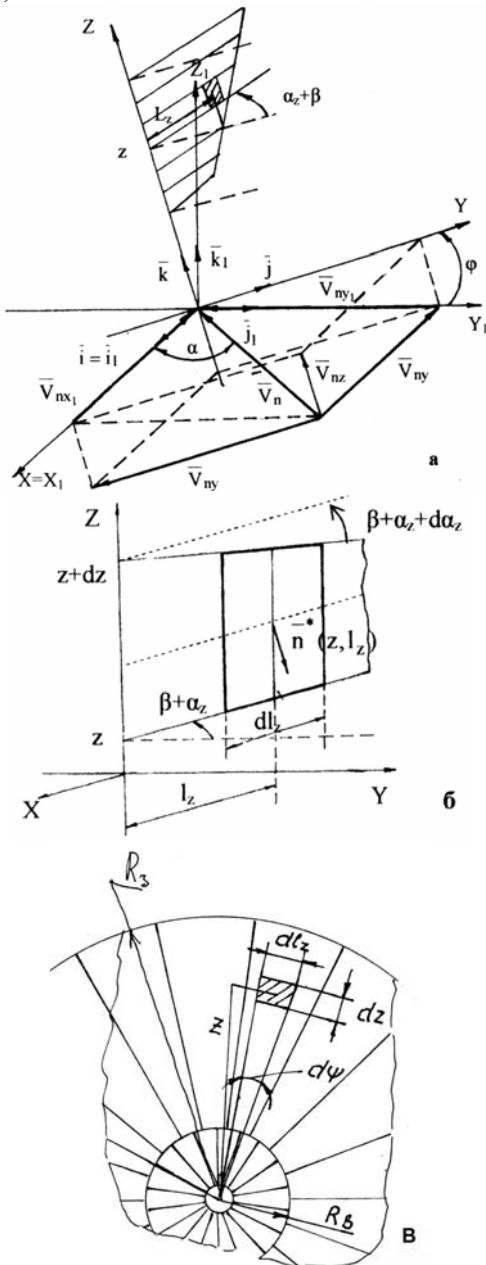


Рис.1 – Лопать з прямолінійною твірною її робочої поверхні: а – компоненти вектора швидкості в нерухомій ($x_1y_1z_1$), рухомій (xyz) системах координат та елементарна площинка лопаті; б – орієнтація елементарної площинки в просторі; в – фронтальний вид елементарної площинки

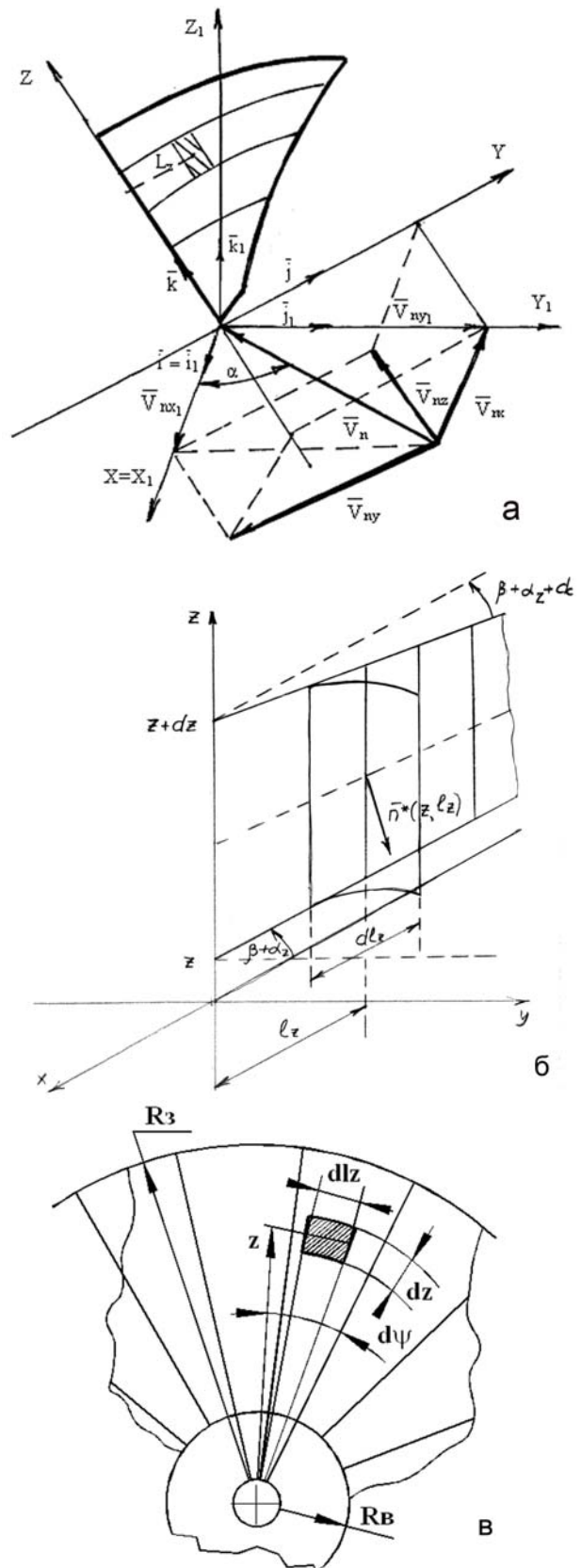


Рис.2 – Лопать постійного профілю робочої поверхні на її радіусі: а – компоненти вектора швидкості в нерухомій ($x_1y_1z_1$), рухомій (xyz) системах координат та елементарна ділянка лопаті; б – орієнтація елементарної ділянки в просторі; в – фронтальний вид елементарної ділянки

У роботі [6] наведена залежність, що дозволяє

визначати потужність d^2N_{z,l_z} , яку відбирає ділянка лопаті елементарної площі $dl_z \cdot dz$ ТВК, що має горизонтальну вісь обертання з горизонтального потоку повітря (див. рис.). Вона має вигляд:

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

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 горизонтальна швидкість 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; $\beta, \frac{d\beta}{dt}$ – кут та швидкість повороту самої лопаті навколо власної осі обертання (навколо маху); α – кут між вектором швидкості потоку повітря та віссю обертання ВК; $\varphi, \frac{d\varphi}{dt}$ – 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) 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 цьому випадку 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 α_{z,l_z} мале, тому допустимо вважати, що $\cos \alpha_{z,l_z} \cong 1$, а $\sin \alpha_{z,l_z} \cong 0$. Довжину dl_z ділянки лопаті елементарної площі $dz \cdot dl_z$ можна представити як $z d\psi$, де ψ – центральний кут ВК. ТВК відрізняються від швидкохідних ВК великою кількістю лопатей, 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:

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

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

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

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 радіусу z . Це дозволяє 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, задача механіки щодо оптимізації швидкості обертання ТВК та профільного кута його лопатей за критерієм максимально можливого відбору потужності зі слабких ПП

розв'язувалася 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 [4,7]. Аналіз структури підінтегрального виразу залежності (3) свідчить, що він не залежить від $\frac{d\alpha_z}{dz}$.

Тоді рівняння Ейлера набирає виду:

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

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

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

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

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

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 параметри.

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:

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

або чисельно, перебором визначити значення ω_k^{on} , при якому N^{on} з (7) набирає максимального значення.

3. ВИСНОВКИ

Отже, залежності (6, 7, 8) дозволяють 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. В цьому випадку є можливість робити лопаті неповоротними.

Аналогічно до того, як залежність (3) була проінтегрована (залежність 5), можна

проінтегрувати і залежність (1), в якій $\frac{d\varphi}{dt} \approx \omega_k^{\text{on}}$ та $\beta_z = \beta_z^{\text{on}}$. Інтегруючи чисельно завжди можна визначити необхідні значення кутів β або α 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 трубці Національного університету "Львівська політехніка" кафедри теплогазопостачання та вентиляції під керівництвом проф. Возняка О.Т. Результати експериментів показали правомірність прийнятих припущень, та достатню для потреб практики точність результатів отриманих аналітично.

4. ЛІТЕРАТУРА

- [1] Дж. Твайдел, А. Уэйр. *Возобновляемые источники энергии*. Перевод с английского под ред. В. А. Коробкова. М.: Энергоатомиздат, 1990, 392 с.
- [2] *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. Книга 1.* Ленинград. Гидрометеоздат 1990, 420 с.
- [3] І. С. Лозовий, М. Б. Кудлик. Моделювання роботи лійчатого-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.
- [4] І. С. Лозовий, М. Б. Кудлик. Оптимальні швидкість обертання тихохідного вітроколеса та профіль його лопатей за критерієм максимального відбору потужності зі слабких потоків повітря. *Вісник НУ "Львівська політехніка" Динаміка, міцність та проектування машин і приладів.* № 434, 2001, с. 92-96.
- [5] М. Б. Кудлик, І. С. Лозовий. Вплив профілю лопаті тихохідного вітроколеса, орієнтації та швидкості його обертання на відбір ним потужності з потоку повітря. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Теплоенергетика, інженерія докільця, автоматизація.* № 452, 2002, с. 269-273.
- [6] Р. В. Зінко, М. Б. Кудлик, Т. І. Круць, І. С. Лозовий. Моделювання роботи вітроенергетичної установки з лопатями постійного профілю на радіусі вітроколеса. *III Міжнародна науково-технічна конференція "Комп'ютерні науки та інформаційні технології" (CSIT-2008).* 25-27 вересня 2008 року, НУ "ЛП", С. 269-272.

- [7] Л. Янг. *Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления*. Москва: Из-во "Мир", 1974, 488 с.



Роман Зінко – доцент кафедри Експлуатація та ремонт автомобільної техніки НУ "Львівська політехніка", працює на посаді доцента. Народився 1970 року. Дисертацію захистив в 2001 році за спеціальністю машинознавство.

Має понад 60 наукових праць. Основний напрямок наукової діяльності – наукові основи створення енергоощадливих машин і механізмів.



Тарас Круць – народився в 1979 році у м. Львові. Закінчив 9 кл. СШ №57 і у 1994 році і продовжив навчання у Львівському автомобільно – дорожньому технікуму по спеціальності "Обслуговування та ремонт автомобілів і двигунів". З 1998 р. продовжив навчання в Національному університеті "Львівська політехніка". Після закінчення Львівської політехніки у 2004 році працює на посаді викладача спеціальних дисциплін у Львівському автомобільно – дорожньому технікумі. Має 3 публікації.

Наукові інтереси – динаміка вітроенергетичних установок.



Ігор Лозовий – доцент кафедри теоретичної механіки НУ "Львівська політехніка", працює на посаді доцента. Народився 1948 року. Дисертацію захистив в 1976 році за спеціальністю динаміка та міцність машин.

Має понад 200 наукових праць. Наукові інтереси – динаміка машин та механізмів.