

УДК 539.3

Л.В. Гловач, канд. техн. наук

В.П. Носенко

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Обговорюються перспективи розвитку вітроенергетики в Україні. Поставлено задачу про динамічний розрахунок конструкції вітроенергетичної установки за інтегрованою розрахунковою схемою. Прийняті до уваги сили тяжіння, аеродинамічні сили та гіроскопічні сили інерції. Побудовані розв'язувальні рівняння. Розроблена методика розрахунку.

**Вступ.** 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.

Доцільність застосування вітрової енергетики визначається, крім великих запасів відновлювальних джерел енергії, ще й цілим рядом інших причин (невичерпністю покладів через постійне відновлення та екологічну чистоту) [1 – 3]. Особливої актуальності даний напрямок набуває в Україні, для якої характерна обмежена кількість запасів енергоносіїв. Так, на сьогоднішній день наша держава забезпечена лише на 10% нафтою і на 18% природним газом. Крім того існує цілий ряд проблем, пов'язаних навіть з розвитком традиційної енергетики; небезпека виникнення аварій, викиди шкідливих речовин та інше. В таких умовах особливого значення набуває використання нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії (енергії Сонця, біомаси, тепла Землі, вітру та інших видів). Вони дозволяють суттєво поповнити енергобаланс як окремих регіонів, так і держави в цілому. Таким чином, необхідно створювати принципово нову систему енергозабезпечення, яка дасть можливість народногосподарським об'єктам отримати суттєву енергетичну незалежність свого розвитку. Значна роль у розв'язанні цієї проблеми належить енергії вітру.

Основні переваги вітроенергетики – екологічність та незначні експлуатаційні затрати. Безсумнівною перевагою вітроенергетики є її відновлюваність. До недавнього часу розвиток цієї галузі стримувався відносно високою вартістю обладнання, його складністю в обслуговуванні, частими поломками і нестабільністю вироблення

електроенергії. Однак все це вдалось подолати. Технологічний процес зробив установки більш дешевими, надійними і досить простими в обслуговуванні. Це сприяло швидкому зростанню даного сектора енергетики.

Вітроенергетика України має достатній досвід виробництва, проектування, будівництва, експлуатації та обслуговування як вітроенергетичних установок (ВЕУ), так і вітроенергетичних станцій (ВЕС); 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 сприятливих умов для внутрішніх і зовнішніх інвесторів.

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 елементів. Вони також повинні бути враховані при моделюванні динамічної поведінки системи.

Враховуючи порівняно високу частоту виникнення непередбачених поломок ВЕУ, можна зробити висновок, що проблема теоретичного моделювання їх динаміки є досить актуальною.

Коливання пружної лопаті при складному стаціонарному обертанні. Розглянемо ротор, який складається з диска та жорстко приєднаних до нього радіально направлених лопатей. Лопаті представляють собою прямі не закручені стержні з постійним по довжині розподілом маси та жорсткості [4 – 6].

Ротор обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  навколо своєї осі симетрії, перпендикулярної площині диска. При цьому вісь власного обертання ротора здійснює плаский поворот з постійною кутовою швидкістю  $\omega_0$  навколо нерухомої прямої, яка проходить через центр ротора перпендикулярно осі власного обертання. Будемо вважати, що  $\omega_0 < \omega$ .

Введемо наступні праві прямокутні системи координат:  $OXYZ$  – інерціальна система координат з початком у центрі ротора;  $Oxuz$  – система координат, жорстко зв'язана з ротором. Осі  $OZ$  та  $Oz$  виберемо таким чином, щоб вони співпали з віссю власного обертання ротора. Виділимо для розгляду одну з лопатей і систему координат  $Oxuz$  зорієнтуємо так, щоб її вісь  $Ox$  співпала з поздовжньою віссю лопаті. Система координат  $OXYZ$  вибрана так, що вісь власного обертання

здійснює поворот в площині  $OXZ$ , а напрям вектора кутової швидкості поворота осі  $\omega_0$  співпадає з віссю  $OY$ . Центри мас та інерції поперечних перерізів лопаті лежать на осі  $Ox$ . Поперечні перерізи лопаті симетричні відносно осей  $Oy$  і  $Oz$ .

Використовуючи принцип Даламбера, дослідимо рівновагу елемента стержня, положення якого в системі  $Oxyz$  визначається координатою  $x$  [10]. Скористаємось лінійною теоремою прямолінійних стержнів. Проектуючи на осі системи координат  $Oxyz$  діючі на елемент сили пружності та інерціальні сили, отримуємо рівняння поздовжніх та згинних у двох площинах коливань лопатей

$$\begin{aligned} EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho F a_x &= 0, \\ -EI_z \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho F a_y + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial v}{\partial x} T(x) \right] &= 0, \\ -EI_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \rho F a_z + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial w}{\partial x} T(x) \right] &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $E$ ,  $\rho$  – відповідно модуль пружності та густина матеріалу лопаті;  $F$ ,  $I_z$ ,  $I_y$  – відповідно площа поперечного перерізу і його моменти інерції відносно осей  $Oz$  і  $Oy$ ;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – компоненти вектора переміщення елемента лопаті вздовж осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ ;  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  – відповідні компоненти вектора абсолютного прискорення елемента.

Поздовжня сила  $T(x)$ , обумовлена власним обертанням ротора з кутовою швидкістю  $\omega$  і яка діє в поперечному перерізі лопаті з координатою  $x$ , обчислюється за формулою

$$T(x) = \rho \int_{x-R}^L (R+s) F ds,$$

де  $R$  – радіус диска ротора;  $L$  – довжина лопаті;  $s = x - R$  – поздовжня координата елемента лопаті, початком відліку якої є край диска.

Для побудови рівнянь руху лопаті, обумовленого поворотом осі ротора, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega_0$ , необхідно визначити компоненти інерційного навантаження, яке виникає при цьому, і діє на елемент лопаті:

$$q_x^l = -\rho F a_x, \quad q_y^l = -\rho F a_y, \quad q_z^l = -\rho F a_z. \quad (2)$$

Вектор абсолютного прискорення, з яким рухається елемент стержня при складному обертанні, визначається теоремою Коріоліса

$$a = a^e + a^r + a^c, \quad (3)$$

де  $a^e, a^r, a^c$  – вектори переносного, відносного та коріолісового прискорення елемента відповідно.

Вектор переносного прискорення  $a^e$  обчислюється за формулою

$$a^e = \varepsilon \times r + \Omega \times (\Omega \times r). \quad (4)$$

Тут  $\Omega$  та  $\varepsilon$  – вектори абсолютних кутової швидкості та кутового прискорення рухомої системи координат  $Oxyz$ ;  $r$  – радіус-вектор елемента стержня у системі координат  $Oxyz$ .

У базисі  $(i_1, j_1, k_1)$  системи координат  $OXYZ$  вектор  $\Omega = \omega + \omega_0$  має вигляд

$$\Omega = 0i_1 + \omega_0 j_1 + \omega k_1. \quad (5)$$

Визначимо в цій же системі координат вектор  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} + \frac{d\omega_0}{dt} = \omega_0 \times \omega. \quad (6)$$

Звідки слідує

$$\varepsilon = \omega \omega_0 i_1 + 0 j_1 + 0 k_1. \quad (7)$$

Введемо фазову координату  $\tau = \omega t$  і визначимо радіус-вектор елемента стержня в системі координат  $OXYZ$ :

$$r = x \cos \tau i_1 + x \sin \tau j_1 + 0 k_1. \quad (8)$$

Здійснивши відповідні векторні операції, отримаємо проєкції переносного прискорення  $a^e$  на осі системи координат  $OXYZ$

$$\begin{aligned} a_x^e &= -x \cos \tau (\omega_0^2 + \omega^2), \\ a_y^e &= -x \omega^2 \sin \tau, \\ a_z^e &= 2x \omega \omega_0 \sin \tau. \end{aligned}$$

В рухомій системі координат  $Oxyz$  компоненти вектора  $a^e$  визначаємо наступним чином:

$$\begin{aligned} a_x^e &= a_X^e \cos \tau + a_Y^e \sin \tau = -x \left( \omega_0^2 \cos^2 \tau + \omega^2 \right), \\ a_y^e &= -a_X^e \sin \tau + a_Y^e \cos \tau = x \omega_0^2 \sin \tau \cos \tau, \\ a_z^e &= a_Z^e = 2x \omega \omega_0 \sin \tau. \end{aligned} \quad (9)$$

Складові вектора відносного прискорення  $a^r$  в напрямку осей системи координат  $Oxyz$

$$a_x^r = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad a_y^r = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad a_z^r = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (10)$$

Вектор коріолісового прискорення  $a^c$  елемента стержня обчислюється за формулою

$$a^c = 2\Omega \times V^r, \quad (11)$$

де  $V^r$  – вектор відносної швидкості елемента зі складовими

$$V_x^r = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad V_y^r = \frac{\partial v}{\partial t}, \quad V_z^r = \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (12)$$

Вектор кутової швидкості рухомої системи координат  $Oxyz$  в базисі  $(i, j, k)$  виражається формулою

$$\Omega = \omega_0 \sin \tau i + \omega_0 \cos \tau j + \omega k. \quad (13)$$

Додаючи відповідні складові із виразів (9) – (11), отримуємо проекції вектора абсолютного прискорення  $a$  елемента стержня на осі системи координат  $Oxyz$ . Потім на основі формул (2) визначаємо складові інтенсивності повного інерційного навантаження, яке діє на елемент стержня при складному обертанні

$$q_x^l = -\rho F \left[ \begin{aligned} &-x \left( \omega_0^2 \cos^2 \tau + \omega^2 \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \\ &+ 2 \left( \omega_0 \cos \tau \frac{\partial w}{\partial t} - \omega \frac{\partial v}{\partial t} \right) \end{aligned} \right],$$

$$\begin{aligned}
 q_y^I &= -\rho F \left[ \begin{aligned} &x\omega_0^2 \sin \tau \cos \tau + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \\ &- 2 \left( \omega_0 \sin \tau \frac{\partial w}{\partial t} - \omega \frac{\partial u}{\partial t} \right) \end{aligned} \right], \\
 q_z^I &= -\rho F \left[ \begin{aligned} &2x\omega\omega_0 \sin \tau + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \\ &+ 2 \left( \omega_0 \sin \tau \frac{\partial v}{\partial t} - \omega_0 \cos \tau \frac{\partial u}{\partial t} \right) \end{aligned} \right]. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Ці розподілені навантаження необхідно враховувати при моделюванні складного обертання лопатей БЕУ.

**Аеродинамічні навантаження на лопать.** Для розрахунку вимушених коливань лопаті необхідно визначити аеродинамічні навантаження, під дією яких виникають ці коливання. Ця задача є однією з найскладніших у загальній аеродинаміці [7 – 8].

Відправними формулами для визначення погонного аеродинамічного навантаження є досить відомі вирази

$$Y = c_y \frac{\rho U^2}{2} b, \quad (15)$$

$$X = c_x \frac{\rho U^2}{2} b, \quad (16)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $b$  – хорда профілю;  $U$  – швидкість потоку, що набігає на профіль;  $c_y, c_x$  – коефіцієнти підйомної сили та лобового опору, які залежать в свою чергу, від кута атаки  $\alpha$ , чисел  $M$  і  $Re$ , форми профілю і стану поверхні відсіку.

У цих виразах наперед відомі лише густина повітря  $\rho$  та хорда  $b$ . Визначимо швидкості і кути атаки. Задачу вирішимо шляхом декількох послідовних переходів. Перший етап – розклад вектора швидкості насуваю чого потоку на дві складові – перпендикулярну  $V_n$  і паралельну  $V_t$  площині обертання гвинта

$$V_n = V \sin \alpha_{н.зб.}, \quad V_t = V \cos \alpha_{н.зб.} \quad (17)$$

Тут  $\alpha_{н.зб.}$  – кут атаки несучого гвинта – кут між вектором швидкості насуваючого потоку і площиною обертання.

Наступний крок – розклад компонента швидкості  $V_t$  на дві складові – перпендикулярну  $V_t''$  і паралельну  $V_t'$  проєкції осі лопаті на площину обертання. Ці компоненти мають вигляд

$$\begin{aligned} V_t' &= V_t \sin \psi = V \cos \alpha_{н.зв.} \sin \psi, \\ V_t'' &= V_t \cos \psi = V \cos \alpha_{н.зв.} \cos \psi, \end{aligned} \quad (18)$$

де  $\psi$  – азимут лопаті.

З урахуванням обертання лопаті повна величина складової швидкості, перпендикулярної до проєкції осі лопаті на площину обертання гвинта, складе

$$V_t^* = \omega r + V_t'' = \omega r + V \cos \alpha_{н.зв.} \sin \psi. \quad (19)$$

Знайдемо тепер швидкості в площині, перпендикулярній до осі лопаті. Нормаль до цієї площини складає з площиною обертання кут  $\beta_r$ , який можна вважати малим, тому

$$\cos \beta_r \approx 1, \quad \sin \beta_r \approx \operatorname{tg} \beta_r = y'. \quad (20)$$

В цій площині проведемо дві осі – вісь  $Ox$ , паралельну площині обертання, і вісь  $Oy$  – перпендикулярну до неї. Тоді проєкції швидкості потоку відносно профілю на ці осі

$$U_x = V_t^* = \omega r + V \cos \alpha_{н.зв.} \sin \psi, \quad (21)$$

$$U_y = V_n \cos \beta_r - V_t' \sin \beta_r - \frac{\partial y}{\partial t} - v_i \approx V_n - V_t' \beta_r - \frac{\partial y}{\partial t} - v_i. \quad (22)$$

У виразі для  $U_y$  наявність перших двох доданків стає зрозумілою із поступового розглядання рис. 1, 2. Третій доданок відповідає швидкості руху перерізу, що розглядається, при коливаннях лопаті у площині змаху. Четверта складова враховує індуктивну швидкість – додаткову швидкість потоку, викликану самим гвинтом. Використовуючи рівності (17) – (19), формулу (22) можна звести до вигляду

$$U_y = V_n \sin \alpha_{н.зв.} - V \cos \alpha_{н.зв.} \cos \psi \frac{\partial y}{\partial r} - \frac{\partial y}{\partial t} - v_i. \quad (23)$$

В деяких випадках зручно використовувати коефіцієнти режиму роботи  $\mu$  та протікання  $\lambda$ , які застосовуються в аеродинаміці гвинта:

$$\mu = \frac{V \cos \alpha_{н.зб.}}{\omega R}, \quad \lambda = \mu \operatorname{tg} \alpha_{н.зб.} - \frac{v_i}{\omega R}.$$

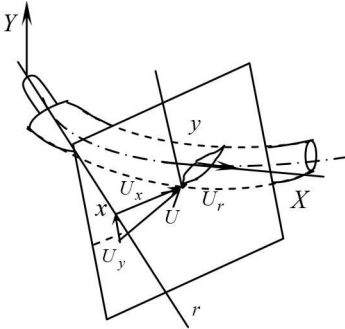


Рис. 1. Схема лопаті

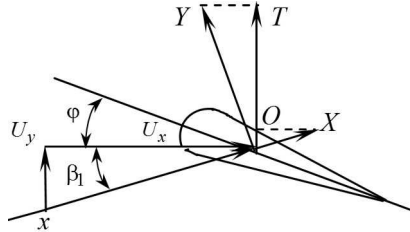


Рис. 2. Поперечний переріз лопаті

Перетворивши праві частини рівностей (21), (23), отримаємо

$$U_x = \omega R(r + \mu \sin \psi), \quad (24)$$

$$U_y = \omega R \left( \lambda - \mu \cos \psi \frac{\partial y}{\partial r} - \frac{1}{\omega R} \frac{\partial y}{\partial t} \right). \quad (25)$$

Відмітимо, що повна швидкість повітря відносно профілю складається з двох компонент  $U_x$ ,  $U_y$  і третього, перпендикулярного до них і направлено по дотичній до пружної осі лопаті, компонента  $U_r$  (див. рис. 1). Однак часто цим компонентом нехтують.

Вихрова теорія аеродинаміки лопатей має свої особливості. Величини індуктивних швидкостей залежать від розміщення та інтенсивності вихрів. Структура вихрів залежить від розподілу аеродинамічного навантаження, яке, в свою чергу, поряд з іншими факторами, визначається розподілом індуктивних швидкостей. Таким чином розрахунок індуктивних швидкостей нерозривно пов'язаний з розрахунком аеродинамічного навантаження. Якщо величина аеродинамічного навантаження визначається без урахування згинних та крутильних коливань лопаті, то можливі суттєві помилки. Тому в загальному випадку необхідно спільно вирішувати три задачі – визначення коливань лопаті, аеродинамічного навантаження та індуктивних швидкостей. Зазвичай у розрахунках при великих швидкостях польоту індуктивна швидкість вважається сталою по радіусу та азимуту і визначається на основі відомої формули Глаурта:



$$\frac{v_i}{\omega R} = \frac{c_\tau}{4\sqrt{\mu^2 + \lambda^2}}.$$

Кут атаки перерізу, як видно з рис. 2, представляє собою суму

$$\alpha = \beta_1 + \varphi, \quad (26)$$

де  $\beta_1$  – кут притоку;  $\varphi$  – кут встановлення лопаті.

Кут притоку визначається, в свою чергу, співвідношеннями:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = U_y / U_x; \quad \cos \beta_1 = U_x / U; \quad \sin \beta_1 = U_y / U, \quad (27)$$

тобто розглянутими вище швидкостями  $U_x$  та  $U_y$ . Кут встановлення представляє собою суму

$$\varphi = \sigma_{a.n.} + \chi \beta_0 + \vartheta_{кр}, \quad (28)$$

де  $\sigma_{a.n.}$  – кут встановлення, обумовлений положенням автомата перекоосу;  $\chi \beta_0$  – кут встановлення від дії компенсатора взмаху з

коефіцієнтом  $\chi$ ;  $\beta_0 = \left. \frac{\partial y}{\partial r} \right|_{r=0}$  – кут повороту комлевого перерізу;  $\vartheta_{кр}$  – кут, отриманий в результаті кручення лопаті в польоті під дією прикладеного до лопаті крутного моменту.

Таким чином, для визначення кутів встановлення лопаті, необхідно виконати аеродинамічний розрахунок, розрахунок балансування і розрахунок кручення лопаті. Часто крученням лопаті нехтують, а аеродинамічний розрахунок і розрахунок балансування здійснюють з припущенням, що лопаті гвинта є абсолютно жорсткими на згин та на кручення.

Для того, щоб нарешті скористатись формулами (15) і (16), необхідно також знайти коефіцієнти  $c_y$  та  $c_x$ . Оскільки кути атаки перерізу лопаті можуть змінюватися у широкому діапазоні, то коефіцієнти  $c_y$  та  $c_x$  визначаються в залежності від кута атаки за результатами так званого кругового продуву, тобто продуву, виконаного при значеннях кута атаки від 0 до 360°.

*Роботу виконано в рамках держбюджетної теми №0109U002146 при фінансовій підтримці Міністерства освіти і науки України.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Андріанов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р.* Ветроэлектрические станции. – Москва, ГЭИ, 1960. – 323 с.
2. *Шедтер Я.И., Рождественский И.В.* Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты. – Москва, “КОЛОС”, 1967. – 376 с.
3. *Харитонов В.П.* Автономные ветроэлектрические установки. – Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 273 с.
4. *Гуляев В.И., Соловьев И.Л., Худолій С.Н.* Прецессионные колебания двухлопастного ротора с упругим несомым валом при сложном вращении. // Проблемы прочности. – 2002. – №2. – С. 73 – 81.
5. *Гуляев В.И., Худолій С.Н.* Колебания криволинейных закрученных лопастей при сложном вращении. // Проблемы прочности. – 2005. – 41, №4. – С. 126 – 132.
6. *Гайдайчук В.В., Худолій С.Н.* Резонансные колебания упругих лопастей при сложном вращении. // Вибрації в техніці та технологіях. – 2004. – №6 (38). – С. 54 – 57.
7. *Гайдайчук В.В., Носенко В.П.* Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень. // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2008. – № 82 – С. 31 – 38.
8. *Гайдайчук В.В., Носенко В.П.* Компьютерное моделирование динамического поведения и прочности конструкций ветроэнергетических установок. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2009. – №3. – С. 22 – 26.
9. *Перельмутер А.В., Микитаренко М.А.* Башни для ветроэнергетических установок: тенденции развития. // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Будівельні конструкції. Будівлі та споруди. – 2001. – Вип. 5 (30). – С. 8 – 13.
10. *Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Кошкин В.Л.* Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней. – Киев: Наукова думка, 1992. – 344 с.
11. *Михеев Р.А.* Прочность вертолетов. – Москва, Машиностроение, 1984. – 280 с.

Отримано 25.05.10

*Гловач Л.В., Носенко В.П.*

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Обсуждаются перспективы развития ветроэнергетики в Украине. Поставлено задачу о динамическом расчете конструкции ветроэнергетической установки с применением интегрированной расчетной схемы. Приняты во внимание силы тяжести, аэродинамические силы и гироскопические силы инерции. Построены разрешающие уравнения. Разработана методика расчета.

*Glovach L.V., Nosenko V.P.*

### **COMPUTER SIMULATION OF DYNAMICS OF WIND POWER STATION BLADES**

The prospects of wind power development in the Ukraine are discussed. The problem on dynamic calculation of a wind power station structure is stated with the use of integrated design scheme. The gravity forces, aerodynamic and gyroscopic inertia forces are taken into account. The constitutive equations are constructed. The calculation techniques are elaborated.