

УДК 539.3

Динамічні процеси в лопатях вітроенергетичних установок

^{1,2}Гуляєв В. І., д.т.н., ¹Гловач Л. В., к.т.н.

¹Національний транспортний університет, Україна
²ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського», Україна

Анотація. Поставлено задачу про динамічний розрахунок конструкції вітроенергетичної установки за інтегрованою розрахунковою схемою. Побудовано розв'язувальні рівняння з урахуванням сил тяжіння, аеродинамічних сил і гіроскопічних сил інерції. Розроблено методику розрахунку.

Аннотация. Поставлена задача о динамическом расчете конструкции ветроэнергетической установки с применением интегрированной расчетной схемы. Построены разрешающие уравнения с учетом сил тяжести, аэродинамических и гироскопических сил инерции. Разработана методика расчета.

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

Ключові слова. Вітроенергетична установка, лопаті, сили інерції, коливання.

Вступ. Виробництво енергії на базі традиційних вугільних та нафтогазових палив веде до забруднення навколишнього середовища твердими частинками, перегріву поверхні землі та утворення великої кількості вуглекислого газу. Це загрожує глобальними порушеннями природної теплової рівноваги з відповідними наслідками для клімату й життя на планеті. До того ж людство використовує для задоволення прямих потреб 2% ресурсів, що видобуваються, інші 98% йдуть на виробництво засобів виробництва й на відходи. Що ж до атомної енергетики, то її недоліки пов'язані з необхідністю перероблення і поховання відпрацьованого палива, а також із небезпекою аварій [1].

Названі чинники стимулювали в 70-х роках двадцятого століття в економічно розвинених країнах широкомасштабні розроблення способів отримання енергії від відновлюваних джерел, таких, як сонце, вітер, біомаса, геотермальні води. Більше того, незалежно від ставлення до атомної енергетики енергетичні програми багатьох країн на сьогодні містять пункти щодо розвитку енергетики на відновлювальних джерелах енергії, так і пункти стосовно підвищення ефективності використання енергії.

Одним із найбільш перспективних способів отримання енергії від відновлюваних джерел є застосування енергії вітру. Вітроенергетичні

установки (ВЕУ) досягли сьогодні рівня комерційної зрілості й у місцях зі сприятливими швидкостями вітру можуть конкурувати з традиційними джерелами електропостачання. З усіляких пристроїв, що перетворюють енергію вітру в механічну роботу, у переважній більшості випадків використовуються лопатеві машини з горизонтальним валом, установлюваним за напрямком вітру. Набагато рідше застосовуються пристрої з вертикальним валом.

Річний приріст енергії, одержуваної останнім часом у Європі за допомогою ВЕУ, перевищує 30%. Настільки потужне зростання спричинене збільшенням кількості подібних установок і підвищенням їх потужності. Стрімкий розвиток технології виробництва напівпровідників, зниження рівня втрат силових ключів і підвищення їх ефективності, поява нових засобів моделювання й проектування дає змогу створювати перетворювачі з унікальними техніко-економічними показниками.

Збільшення потужності силових ключів і постійне прагнення до зниження їх малогабаритних показників перетворюють розроблення конструкції силових перетворювачів на один із найскладніших етапів проектування. Це повною мірою стосується конвекторів вітротурбін – одного з найбільш енергонасичених виробів сигової електроніки. Загальні підходи до проектування ВЕУ, у принципі, застосовні до всіх виробів сигової електроніки, тому на прикладі перетворювачів ВЕУ можна простежити основні тенденції її розвитку.

Одна з основних перешкод розвитку вітроенергетичних установок пов'язана з труднощами моделювання їх динамічної поведінки. Адже 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 ВЕУ аналізується в [2–4]. Однак, як показано в [5–6], особливі динамічні ефекти в лопатях (і вежі ВЕУ) виникають при складному обертанні ротора, коли його вісь під дією вітрового потоку розвертається. Вплив цих ефектів на загальну міцність і динамічну поведінку ВЕУ залишаються мало вивченими до цього часу. Враховуючи порівняно високу частоту виникнення непередбачених поломок ВЕУ, можна зробити висновок, що проблема теоретичного моделювання їх динаміки є актуальною.

Постановка задачі. Одним із найнебезпечніших видів навантажень, котре діє на лопать ВЕУ, є гіроскопічна сила інерції, викликана її складним обертанням. Такий вид навантаження реалізується, коли під дією вітрового потоку, що змінює свій напрям, вісь ротора повертається, і лопать починає обертатися відносно двох осей одночасно. Тоді на елемент лопаті довжиною dr діє періодична гіроскопічна сила:

$$dF = 2r\omega\omega_0 \sin \omega t \gamma dr, \quad (1)$$

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

Оскільки ця сила діє з частотою ω , то при її наближенні до частоти власних коливань лопаті виникають резонансні ефекти. Збуджені ними коливання через втулку лопаті передаються і на башту, тому вони можуть привести до руйнування не тільки лопатей, але і всієї конструкції ВЕУ.

Найбільш ефективним для дослідження динаміки всієї конструкції башти ВЕУ є метод скінченних елементів. Проте конструкція лопатей має таку форму та піддається впливу гіроскопічних сил інерції, які затрудняють застосування скінченно-елементних моделей. Тому для їх розрахунку доцільно застосовувати особливий обчислювальний блок.

Розглядаючи рівновагу деякої ділянки пружного криволінійного та закрученого елемента лопаті, можна записати два векторних рівняння:

$$\frac{d\vec{F}}{ds} = -\vec{f}, \quad \frac{d\vec{M}}{ds} = -\vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}, \quad (2)$$

які інваріантні відносно будь-якої системи координат.

Тут \vec{F} і \vec{M} – відповідно, вектори внутрішніх пружних сил і моментів; \vec{f} та \vec{m} – вектори зовнішніх погонного навантаження і погонного моменту; $\vec{\tau}$ – одиничний вектор, дотичний до пружної осі; S – довжина дуги пружної лінії.

В проекціях на осі головного тригранника, утвореного віссю W , що спрямована по дотичній до пружної лінії лопаті ВЕУ, та головними осями інерції стержня u і v , запишемо систему рівнянь рівноваги сил

$$\begin{aligned} dF_u/ds &= -qF_w + rF_v - f_u, \\ dF_v/ds &= -rF_u + pF_w - f_v, \\ dF_w/ds &= -pF_v + qF_u - f_w \end{aligned} \quad (3)$$

і моментів

$$\begin{aligned} dM_u/ds &= -qM_w + rM_v + F_v - m_u, \\ dM_v/ds &= -rM_u + pM_w - F_u - m_v, \\ dM_w/ds &= -pM_v + qM_u - m_w. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут F_u й F_v – сили поперечного перерізу; F_w – поздовжня сила; M_u та M_v – згинні моменти; M_w – крутний момент; f_u і f_v – зовнішні розподілені поперечні навантаження; m_u , m_v і m_w – зовнішні розподілені згинні і крутні моменти, що виникають під дією аеродинамічних сил; p , q , r – функції кривини й кручення лопатей у деформованому стані.

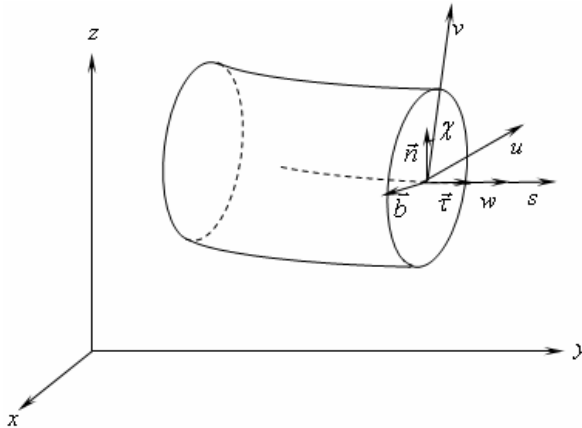


Рис. 1. Схема орієнтації осей u, v, w та рухомого триєдра

Враховуючи, що осі головного тригранника (u, v, w) є головними осями згину та кручення елемента стержня, проекції M_u, M_v, M_w головного моменту M внутрішніх сил представимо у вигляді:

$$M_u = A(p - p_0), \quad M_v = B(q - q_0), \quad M_w = C(r - r_0), \quad (5)$$

де p, q, r – функції кривизни й кручення стержня в деформованому стані; p_0, q_0, r_0 – ці ж функції у вихідному недеформованому стані; A, B, C – жорсткості при згині й крученні.

Для обчислення A, B, C випишемо рівності:

$$A = E I_u, \quad B = E I_v, \quad C = G I_k, \quad (6)$$

де E – модуль пружності матеріалу лопаті; G – модуль зсуву; I_u, I_v – моменти інерції площі поперечного перерізу лопаті відносно осей u, v ; I_k – полярний момент інерції перерізу.

Якщо у виразах для $\vec{f}, \vec{F}, \vec{m}$ та \vec{M} врахувати інерційні навантаження, то система рівнянь (3) і (4) буде описувати рух елемента лопаті у загальному випадку.

Ці рівняння є основою для різних досліджень складних коливань лопаті. З них можна одержати також рівняння для більш простих частинних випадків. Приймаючи, наприклад, $M_u = M_w = 0$, одержимо рівняння згину в площині найменшої жорсткості. При $M_w = 0$ матимемо систему рівнянь для розрахунку сумісних згинних коливань у двох площинах закрученої лопаті:

$$\begin{aligned} dF_u/ds + qF_w - rF_v &= -f_u, & dM_u/ds - rM_v &= F_v - m_u, \\ dF_v/ds + rF_u - pF_w &= -f_v, & dM_v/ds + rM_u &= -F_u - m_v. \end{aligned} \quad (7)$$

Із останнього рівняння системи (4) одержимо співвідношення:

$$dM_w/ds = -(pM_v - qM_u) - m_w, \quad (8)$$

яке визначає крутні моменти, що діють на елемент лопаті.

Дія на лопать аеродинамічних сил. Для розрахунку вимушених коливань лопаті необхідно визначити аеродинамічні навантаження, під дією яких виникають ці коливання.

Відправними формулами для визначення погонного аеродинамічного навантаження є досить відомі вирази:

$$Y = c_y \frac{\rho U^2}{2} b, \quad (9)$$

$$X = c_x \frac{\rho U^2}{2} b, \quad (10)$$

де ρ – 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 α , форми профілю і стану поверхні відсіку.

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

$$V_n = V \sin \alpha_{н.зв.}, \quad V_t = V \cos \alpha_{н.зв.} \quad (11)$$

Тут $\alpha_{н.зв.}$ – 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:

$$\begin{aligned} V_t' &= V_t \sin \psi = V \cos \alpha_{н.зв.} \sin \psi, \\ V_t'' &= V_t \cos \psi = V \cos \alpha_{н.зв.} \cos \psi, \end{aligned} \quad (12)$$

де ψ – азимут лопаті.

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

$$V_t^* = \omega r + V_t'' = \omega r + V \cos \alpha_{н.зв.} \sin \psi. \quad (13)$$

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

$$\cos \beta_r \approx 1, \quad \sin \beta_r \approx \operatorname{tg} \beta_r = y'. \quad (14)$$

У 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

$$U_x = V_t^* = \omega r + V \cos \alpha_{н.зв.} \sin \psi, \quad (15)$$

$$U_y = V_n \cos \beta_r - V_t' \sin \beta_r - \frac{\partial y}{\partial t} - v_i \approx V_n - V_t' \beta_r - \frac{\partial y}{\partial t} - v_i. \quad (16)$$

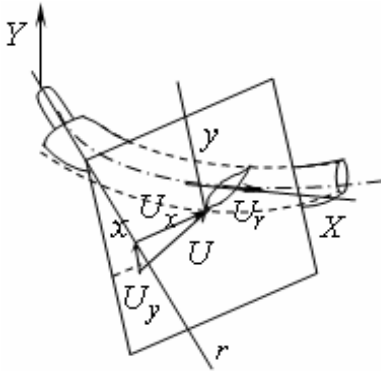


Рис. 2. Схема лопаті

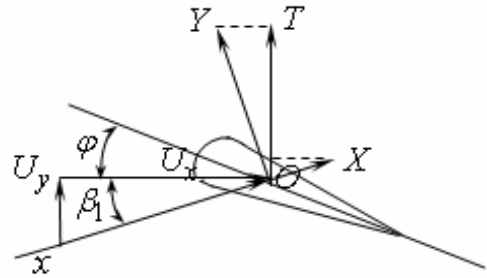


Рис. 3. Поперечний переріз лопаті

У деяких випадках зручно використовувати коефіцієнти режиму роботи μ та протікання λ , які застосовуються в аеродинаміці гвинта:

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

Перетворивши праві частини рівностей (15), (16), отримаємо

$$U_x = \omega R(r + \mu \sin \psi), \quad (18)$$

$$U_y = \omega R \left(\lambda - \mu \cos \psi \frac{\partial y}{\partial r} - \frac{1}{\omega R} \frac{\partial y}{\partial t} \right). \quad (19)$$

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. 2). 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 за радіусом та азимутом і визначається на основі відомої формули Глауерта:

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

Кут атаки перерізу, як видно з рис. 3, представляє собою суму:

$$\alpha = \beta_1 + \varphi \quad (20)$$

де β_1 – кут притоку; φ – кут встановлення лопаті.

Кут притоку визначається, в свою чергу, співвідношеннями:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = U_y / U_x; \quad \cos \beta_1 = U_x / U; \quad \sin \beta_1 = U_y / U, \quad (21)$$

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

$$\varphi = \sigma_{a.n.} + \chi\beta_0 + \mathcal{G}_{кр}, \quad (22)$$

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

коефіцієнтом χ ; $\beta_0 = \frac{\partial y}{\partial r} \Big|_{r=0}$ – кут повороту комлевого перерізу;

$\mathcal{G}_{кр}$ – 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 із припущенням, що лопаті гвинта є абсолютно жорсткими на згин та на кручення.

Висновки. В роботі проведено аналіз основних факторів, які впливають на динамічну поведінку і міцність вітроенергетичних установок. Зроблено висновки про необхідність комплексного підходу до розрахунку конструкцій ВЕУ з урахуванням їх попереднього напруження силами інерції і гіроскопічної взаємодії обертальних та лінійних видів руху.

Література

- [1] Берковский Б. М. Возобновляемые источники энергии на службе человека / Б. М Берковский, В. А. Кузьминов. – М. : Наука, 1987. – 128 с.
- [2] Шефтер Я. И. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты / Я. И. Шефтер, И. В. Рождественский. – М. : КОЛОС, 1967. – 376 с.
- [3] Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки / В. П. Харитонов – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 273 с.
- [4] Ляхтер В. М. Ветровые станции большой мощности. Обзорная информация / В. М. Ліхтер. – М. : Информэнерго, 1987. – 72 с.
- [5] Гуляев В. И. Колебания криволинейных закрученных лопастей при сложном вращении / В. И Гуляев, С. Н Худолий // Прикладная механика. – 2005. – № 4. – С. 126–132.
- [6] Гловач Л. В. Комп'ютерне моделювання динаміки лопатей вітроенергетичних установок / Л. В. Головач, В. П. Носенко // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2010. – № 85 – С. 143–152.

Надійшла до редколегії 10.07.2011 р.