

УДК 621.548

В.М. Корендій

Національний університет "Львівська політехніка"

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ПІДСИСТЕМИ ВІТРОУСТАНОВКИ

На основі спрощеної кінематичної схеми вітроустановки виведено аналітичні залежності для визначення основних навантажень, які виникають внаслідок складного руху лопатей вітроколеса при використанні в його конструкції механізмів повороту за напрямком повітряного потоку та зміни кута атаки лопатей. Проаналізовано знакозмінний характер навантажень, побудовано відповідні графічні залежності та обґрунтовано доцільність їх врахування при побудові математичних моделей динаміки горизонтально-осьових вітроустановок.

Ключові слова: кінематична схема вітроустановки, складний рух лопатей, знакозмінний характер навантажень, механізм зміни кута атаки.

Постановка проблеми. Україна належить до країн, які лише частково забезпечені власними енергоресурсами. Загальний рівень енергозалежності нашої держави становить близько 55 %, що в цілому відповідає середньоєвропейському рівню [1]. Важливим кроком у розвитку вітчизняної економіки стало прийняття «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», згідно з якою частка нетрадиційних та відновлюваних джерел в загальному енергобалансі країни досягне 15,5 %. Саме тому актуальними завданнями на даний час є проведення великого обсягу досліджень способів використання альтернативної енергетики, визначення та впровадження найбільш оптимальних енерготехнологій для різних типів споживачів, вивчення можливостей застосування світових досягнень в енергетичній галузі тощо.

За обсягами виробництва вітрової електроенергії Україна посідає 25-е місце у світі та 14-е в Європі і вважається лідером не лише серед країн СНД, але й Східної Європи [1]. Однак більшість зусиль науковців і дослідників на даний час зосереджені на розвитку комерційної вітроенергетики і залишаються поза увагою такі її види, як «сільська», «фермерська», «для дачних ділянок» тощо. Тому актуальними на даний час є розробки дешевих екологічно чистих вітроустановок (ВУ) малої одиничної потужності (до 30 кВт), які могли б використовуватися не тільки для забезпечення електричною енергією населення у сільській місцевості, але й застосовуватися для безпосереднього механічного приводу багатьох машин (системи подачі води на ферми, зрошування угідь, розмелювання зерна, подрібнення кормів, вентиляції складських і підвальних приміщень тощо). При цьому слід відмітити, що інтенсивність повітряних потоків на території України є досить сприятливою для використання «малих» вітроустановок.

Однією з проблем використання ВУ є підвищення ефективності їх функціонування при поривчастих вітрах. Для максимізації відбору потужності й стабілізації кутової швидкості обертання вітроколеса застосовують спеціальні механізми регулювання, які в більшості сучасних установок малої потужності забезпечують зміну кута атаки лопатей в залежності від швидкості набігаючого повітряного потоку і навантаження на валу вітроколеса. Актуальними завданнями на даний час є оптимізація конструкцій та моделювання роботи вказаних механізмів з метою забезпечення найбільш ефективного функціонування вітроустановки [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складність адекватного математичного опису динамічної поведінки лопатей горизонтально-осьових вітроустановок спричинила неабиякий інтерес до цього питання серед дослідників, конструкторів і вчених, які займаються питаннями проектування й удосконалення вітроенергетичного обладнання. Особливо актуальними є завдання оптимального регулювання потужності й кутової швидкості вітроколеса, яке на даний час у переважній більшості «малих» ВУ здійснюється завдяки спеціальному механізму повороту лопатей навколо власних поздовжніх осей [2]. У вітроустановках із такими системами керування кутом атаки лопаті мають можливість обертатися навколо трьох осей: башти (при орієнтації за напрямком вітру), гондоли (внаслідок взаємодії з повітряним потоком) і власних поздовжніх осей. Таким чином, окрім аеродинамічних та гравітаційних навантажень, які уже досить ґрунтовно вивчені [3, 4], на лопаті діють відцентрові, дотичні й коріолісові сили інерції, які також необхідно враховувати при моделюванні роботи та проектуванні вітроенергетичного обладнання, зважаючи на їх циклічний характер та велику частоту, яка інколи може сягати частоти власних коливань системи і спричиняти несприятливі резонансні режими [5, 6].

Формулювання цілі статті. Вивести аналітичні залежності для визначення навантажень на лопаті горизонтально-осьової вітроустановки, побудувати відповідні часові графіки, проаналізувати знакозмінний характер навантажень кожного типу та обґрунтувати доцільність їх врахування при побудові математичних моделей динамічної поведінки лопатей.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо спрощену принципову схему вітроустановки, зображену на рис. 1. Типова ВУ складається із фундаменту, башти, гондоли, вітроколеса і лопатей. Якщо розглядати усі ці елементи як тверді тіла, а в'язі, які їх з'єднують як ідеальні, то можна з легкістю побудувати диференціальні рівняння складного руху системи, кількість яких залежатиме від кількості лопатей N і становитиме $2+N$. Проблема лише полягає в адекватному математичному описі узагальнених сил, які відповідають кожній узагальненій координаті.

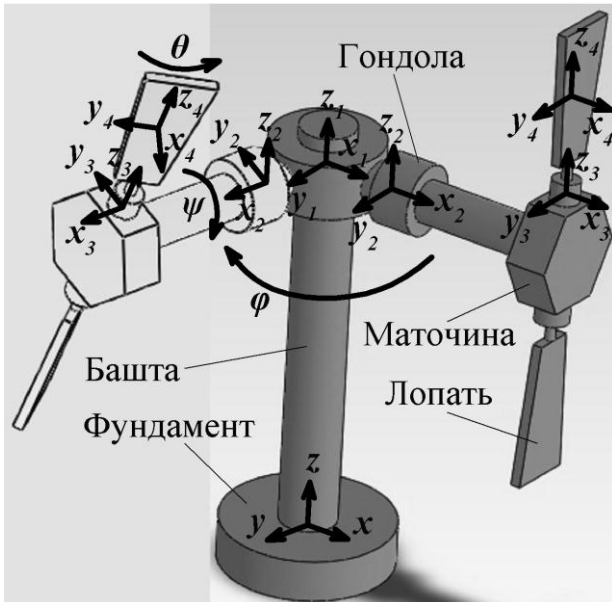


Рис. 1. Принципова схема вітроустановки

Розглянемо спершу аеродинамічні навантаження на хвостовий стабілізатор, які спричиняють поворот гондоли за напрямком вітрового потоку. Як відомо, при дослідженні динамічної поведінки будь-яких елементів машини чи механізму найнебезпечнішими вважаються повторно-змінні в часі (циклічні) навантаження, що відбуваються з частотою, яка співрозмірна із частотою власних коливань системи. В нашому випадку напрям повітряного потоку також змінюється в часі. Тому для спрощення розрахунків, можемо припустити, що характер дії аеродинамічних сил є циклічним. У такому разі, їх амплітуда буде рівною максимальному впливу вітрового потоку на перпендикулярну до його напрямку площину хвостового стабілізатора, а частота залежатиме від пульсації напрямку вітру. Враховуючи прийняті вище припущення, вплив аеродинамічних сил на поворот гондоли

(тобто узагальнену силу Q_φ) можемо описати наступною періодичною функцією:

$$Q_\varphi = 0.5 \cdot \rho_n \cdot S \cdot l_{xc} \cdot (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2, \quad (1)$$

де ρ_n – густина повітря; S – площа хвостового стабілізатора; l_{xc} – відстань від осі башти до середини хвостового стабілізатора; V_H – номінальна швидкість вітру; s і k – коефіцієнти величини і періодичності пульсації швидкості вітру, відповідно, ($s = 0.2 \dots 0.6$, $k = 0.5 \dots 1$).

Обертання вітроколеса відбувається за рахунок дії аеродинамічного моменту M_A на лопаті при навантаженні M_H на його валу. Характеристика аеродинамічного моменту довільного горизонтально-осьового вітроколеса можна наближено апроксимувати квадратичною параболою:

$$M_A = 0.5 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_n \cdot (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \times \left[\alpha \cdot \frac{\psi \cdot R}{V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t)} - \beta \cdot \left(\frac{\psi \cdot R}{V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t)} \right)^2 - \gamma \right], \quad (2)$$

де R – величина зовнішнього радіуса вітроколеса; ψ – кутова швидкість вітроколеса; α , β , γ – сталі коефіцієнти, величини яких можна визначити з експериментальних кривих аеродинамічного моменту вітроколеса, використовуючи, наприклад, метод найменших квадратів.

Експлуатаційний момент навантаження на валу вітроколеса для наближених інженерних розрахунків можна подати наступним чином:

$$M_H = M \cdot (\psi)^m, \quad (3)$$

де M – коефіцієнт пропорційності; m – показник степеня. У випадку застосування гвинтових насосів, шнекових або транспортерних механізмів $m=0$, а величина M_H постійна. Коли ж вітроколесо використовується для приводу електрогенераторів або різних типів гідравлічних чи пневматичних насосів величина m може коливатися в межах $1 \dots 2$.

Таким чином, узагальнену силу Q_ψ , яка спричинятиме обертання вітроколеса, враховуючи залежності (2) і (3), можна представити у наступному вигляді:

$$Q_\psi = M_A - M_H = 0.5 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_n \cdot (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \times \\ \times \left[\alpha \cdot \frac{\dot{\psi} \cdot R}{V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t)} - \beta \cdot \left(\frac{\dot{\psi} \cdot R}{V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t)} \right)^2 - \gamma \right] - M \cdot (\dot{\psi})^m. \quad (4)$$

Зовнішні навантаження, які впливають на поворот лопаті навколо власної поздовжньої осі, можна розділити на аеродинамічні, інерційні та гравітаційні. Оскільки центр мас лопаті при використанні механізму зміни кута атаки дещо зміщений відносно її поздовжньої осі, то обертовий момент від аеродинамічних сил становитиме:

$$M_p = 0.5 \cdot n \cdot b_l \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \cdot \left((\dot{\psi})^2 \cdot (R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2) + (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \right), \quad (5)$$

де n – коефіцієнт, який враховує несиметричність розміщення осі лопаті і рівний відношенню різниці між лобовими поверхнями лопаті по обидва боки від осі до її загальної площі ($n \approx 0.5 \dots 0.75$); b_l – приведена відстань від осі обертання до центру мас лопаті; l_p – довжина лопаті; d_p – ширина серединного поперечного перерізу; R_l – відстань від осі гондоли до центру мас лопаті; θ – кут відхилення центру мас лопаті від площини обертання вітроколеса.

Максимальний вплив гравітаційних навантажень на поворот лопаті матиме місце при горизонтальному положенні її осі і $\theta = 90^\circ$ [2]. Відповідний обертовий момент можемо записати наступним чином:

$$M_g = m_l \cdot g \cdot b_l \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta), \quad (6)$$

де m_l – приведена маса лопаті; g – пришвидшення вільного падіння; ψ – кут відхилення поздовжньої осі лопаті від верхнього вертикального положення.

Відцентрові та дотичні інерційні навантаження, які діють на лопать вітроустановки та впливають на зміну узагальненої координати θ , виникають при нерівномірному обертанні гондоли навколо поздовжньої осі башти та вітроколеса навколо осі гондоли [5, 6]. Їх сумарну дію можна описати наступною залежністю:

$$M_{in} = m_l \cdot b_l \cdot \left(\dot{\phi}^2 \cdot (l_{ск} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot \cos \theta + \ddot{\phi} \cdot (l_{ск} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot \sin \theta + \ddot{\psi} \cdot R_l \cdot \sin \theta \right), \quad (7)$$

де m_l – приведена маса лопаті; $l_{ск}$ – відстань від осі башти до осі лопаті; $\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$ – кутові швидкість і пришвидшення обертання гондоли; $\ddot{\psi}$ – кутове пришвидшення вітроколеса.

Коріолісові сили інерції виникають при одночасному обертанні гондоли і вітроколеса, гондоли і лопаті, вітроколеса і лопаті. У першому і другому випадках переносим буде рух гондоли, у третьому – вітроколеса. Відповідно, відносним у першому випадку буде рух вітроколеса, у другому і третьому – лопаті. Вказані навантаження були детально проаналізовані в [5, 6] та інших роботах авторів. В напрямі руху лопаті діє лише коріолісова сила інерції при одночасному обертанні гондоли і вітроколеса, а її вплив можна описати наступною залежністю:

$$M_{cor} = 2 \cdot m_l \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\psi} \cdot \sqrt{R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi \cdot b_l \cdot \cos \theta. \quad (8)$$

Таким чином, узагальнену силу Q_θ , з урахуванням рівнянь (5), (6), (7) і (8) можемо представити у наступному вигляді:

$$Q_\theta = M_p + M_g + M_{in} + M_{cor} = 0.5 \cdot n \cdot b_l \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \cdot \left((\dot{\psi})^2 \cdot (R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2) + \right. \\ \left. + (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \right) + \\ + m_l \cdot g \cdot b_l \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) + m_l \cdot \left(\dot{\phi}^2 \cdot (l_{ск} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot b_l \cdot \cos \theta + \right. \\ \left. + \ddot{\phi} \cdot (l_{ск} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot b_l \cdot \sin \theta + \ddot{\psi} \cdot R_l \cdot b_l \cdot \sin \theta \right) + \\ + 2 \cdot m_l \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\psi} \cdot \sqrt{R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi \cdot b_l \cdot \cos \theta. \quad (9)$$

З метою аналізу часових залежностей (1), (4) і (9) та представлення результатів у графічному вигляді використаємо програмний комплекс Mathematica. У таблиці 1 задано початкові умови та

вибрано основні геометричні розміри й параметри руху вітроустановки (нерівномірного обертання гондоли, вітроколеса і лопаті) з метою забезпечення її номінальної потужності 3 кВт при розрахунковому значенні швидкості вітру $V_H = 9$ м/с.

Таблиця 1

Початкові умови, геометричні розміри й параметри руху вітроустановки

$\theta(0), \psi(0), \varphi(0), \text{рад}$			$\dot{\theta}(0), \dot{\psi}(0), \dot{\varphi}(0), \text{рад/с}$			$m_l, \text{кг}$	$b_l, \text{м}$	$l_p(R, l_{xg}) \approx 2 \cdot R_l, \text{м}$		
0			0			20	0.1	2.5		
$\theta(t), \psi(t), \varphi(t), \text{рад}$			$\dot{\theta}(t), \dot{\psi}(t), \dot{\varphi}(t), \text{рад/с}$			$l_{вк}, \text{м}$	$d_p, \text{м}$	s	k	n
$0.01 \cdot t^2, 0.8 \cdot t^2, 0.032 \cdot t^2$			$0.02 \cdot t, 1.6 \cdot t, 0.064 \cdot t$			1	0.25	0.6	1	0.65
α	β	γ	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$			m			$S, \text{м}^2$	
0.031	0.002	0.067	0	100		0	1	2	1	

На основі рівнянь (1), (4), (9) і даних таблиці 1 побудуємо на рис. 2 часові залежності кожної з узагальнених сил. Припускаємо, що час запуску вітроколеса до досягнення ним номінальної частоти обертання 150 об/хв ($\omega_2 = 15.7$ рад/с) дорівнює 10 с. Слід зауважити, що режим запуску вітроустановки включає у себе: поворот лопатей з флюгерного в оптимальне положення з метою максимального відбору потужності з потоку повітря; зміну положення гондоли за напрямком вітру для забезпечення перпендикулярності напрямку повітряного потоку до площини обертання вітроколеса; зміну частоти обертання вітроколеса до номінального значення. Також до неусталених (перехідних) і небезпечних режимів роботи вітроустановки, у яких вона може працювати обмежений проміжок часу, відносяться приєднання до мережі (навантаження), нормальна чи аварійна (екстрена) зупинка, когерентні (екстремальні) пориви вітру тощо.

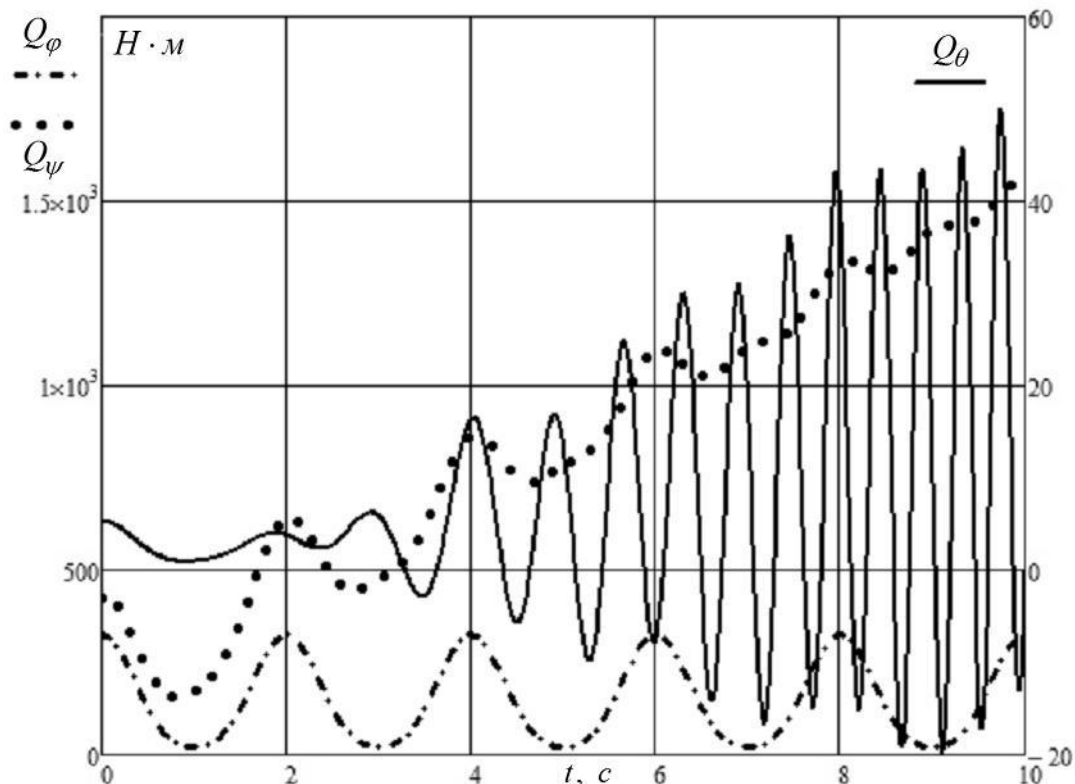


Рис. 2. Часові залежності узагальнених сил у режимі запуску вітроколеса

Отже, як бачимо із поданих на рис. 2 графічних залежностей, у перехідному режимі роботи вітроустановки (в даному випадку – режимі запуску) усі узагальнені сили мають змінний у часі характер. При цьому амплітуда і частота коливань сили Q_φ практично не залежать від часу, тоді як амплітуда і частота Q_ψ – зменшуються, а Q_θ – збільшуються. Середня величина сил Q_ψ і Q_θ

зростає протягом усього режиму пуску, тоді як величина Q_ϕ залишається приблизно однаковою. Враховуючи той факт, що власна частота коливань пружних лопатей горизонтально-осьових вітроколів може знаходитися в межах 10 Гц [2], то гостро постають питання про дослідження можливостей виникнення резонансних режимів при роботі вітроустановок, які використовують у своїй конструкції механічні системи регулювання потужності (відцентрові пружинні регулятори).

Висновки. Складність адекватного математичного опису динамічної поведінки лопатей горизонтально-осьових вітроустановок спричинена багатьма факторами, зокрема, часовою мінливістю напрямку і швидкості повітряних потоків та використанням у конструкції вітроколів механізмів регулювання частоти їх обертання шляхом повороту лопатей навколо власних поздовжніх осей. При цьому лопаті мають можливість додатково обертатися навколо осі башти при орієнтації вітроустановки за напрямком вітру та осі гондоли при перетворенні поступального руху повітряного потоку на обертальний рух вітроколеса. При складному русі лопатей виникають змінні у часі інерційні навантаження (відцентрові, дотичні, коріолісові), які можуть спричиняти резонансні режими при роботі вітроустановок та знижувати втомну міцність лопатей.

У даній роботі розглянуто спрощену принципову схему вітроустановки, на якій показано ступені вільності її твердотільної підсистеми – обертання навколо осей башти, гондоли і лопаті. З метою побудови рівнянь Лагранжа другого роду для опису складного руху лопатей у подальших етапах досліджень, виведено аналітичні залежності для знаходження узагальнених сил, які відповідають кожному ступеню вільності системи. Побудовано і проаналізовано часові графічні залежності вказаних сил у режимі запуску вітроколеса та обґрунтовано можливості виникнення резонансних режимів при роботі вітроустановки.

У подальших дослідженнях планується розглянути задачі оптимізації роботи механічних систем регулювання потужності горизонтально-осьових вітроколів з метою одночасного забезпечення високої ефективності їх функціонування і уникнення можливостей появи резонансних режимів.

1. Перспективи енергозабезпечення України в контексті світових тенденцій: Монографія / За заг. науковою ред. А.І. Шевцова. – Дніпропетровськ: РФ НІСД, 2008. – С. 208.
2. Корендій В.М. Моделювання навантажень та проектування тихохідного вітроколеса / В.М. Корендій // Наукові нотатки. – 2011. – № 35. – С. 110-115.
3. Гайдайчук В.В. Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень / В.В. Гайдайчук, В.П. Носенко // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2008. – № 82. – С. 31-38.
4. Голубенко Н.С. Исследование нагрузок на лопасть турбины электрической ветряной турбогенераторной установки / Н.С. Голубенко, А.С. Белогуров, С.А. Белогуров, А.А. Яцура // Вісник інженерної академії України. – 2008. – № 3-4. – С. 186-191.
5. Кузьо І.В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Наукові нотатки. – 2011. – № 33. – С. 115-123.
6. Кузьо І.В. Аналіз гравітаційних та інерційних навантажень при нерівномірному складному русі лопатей вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Праці Одеського політехнічного університету. – 2011. – № 2. – С. 52-57.