

Корендій В. М.

Національний
університет
"Львівська
політехніка"

УДК 621.548

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ТИХОХІДНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ

Проанализировано динамику тихоходной горизонтально-осевой ветроустановки с механизмами ориентации ротора за направлением ветра и поворота лопастей вокруг собственных продольных осей с целью регулирования мощности. Выполнено моделирование режима работы со случайным характером скорости ветра и изменения нагрузки.

The dynamics of low-speed horizontal-axis wind turbine with the mechanisms of rotor orientation after the wind direction and blades turning round their own longitudinal axes for the purpose of power regulation is analyzed. The modeling of work mode is performed for random character of wind speed and load variations.

Вступ. Розвиток суспільства нерозривно пов'язаний зі збільшенням обсягів споживання енергії. При цьому традиційні енергетичні ресурси, які поступово виснажуються, спричиняють глобальні зміни клімату і становлять велику екологічну небезпеку. Одним із найбільш розповсюджених і перспективних альтернативних джерел енергії, яке потенційно може замінити теплові електростанції, спричиняючи найменш шкідливий вплив на довкілля, порівняно з іншими галузями, є вітроенергетика. І хоча економічно вигідними для виробництва електроенергії є території з середньорічними швидкостями вітру понад 5 м/с, все ж використання вітроустановок для безпосереднього механічного приводу різноманітних машин і механізмів у сільському господарстві (підйом води, зрошення угідь, перемелювання зерна, подрібнення кормів, вентиляція складських і підвальних приміщень тощо) є можливим уже при 2 м/с.

Проектування та виробництво сучасних конкурентоздатних вітроустановок потребує детального аналізу динамічних процесів перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в інші види енергії (електричну, механічну тощо). При цьому для регулювання відбору потужності з потоків повітря в більшості «малих» вітроустановок використовуються спеціальні механізми повороту лопатей навколо власних поздовжніх осей, а для забезпечення перпендикулярності напрямку вітру до площини ротора – механізми орієнтації (хвостовий стабілізатор тощо).

Постановка проблеми. Основною особливістю вітроустановок є робота в умовах

змінної швидкості й напрямку вітру, окремі пориви якого можуть суттєво перевищувати його середню швидкість. Досить часто також виникають так звані когерентні пориви, які супроводжуються одночасними різкими миттєвими змінами швидкості до 60% від номінального значення і напрямку вітру до 90° від попереднього положення осі вітроколеса. При цьому спрацьовують відповідні механізми орієнтації та регулювання потужності, спричиняючи поворот лопатей одночасно навколо трьох осей: башти (при повороті гондоли), вітроколеса і власних поздовжніх осей. Складний рух лопатей, спричинений мінливістю напрямку і швидкості повітряних потоків, становить неабияку проблему при моделюванні роботи вітроустановок, оскільки спричиняє значні труднощі в адекватному математичному описі зовнішніх навантажень та необхідність врахування додаткових інерційних сил (відцентрових, дотичних, коріолісових), які за амплітудою можуть сягати всього 10% від величини аеродинамічних навантажень, проте частота їх збурення може бути співмірною із частотою власних коливань системи. Таким чином, внаслідок складного руху лопатей при змінних вітрах мають місце коливні процеси, які поряд із можливістю виникнення резонансних режимів при роботі вітроустановки спричинятимуть пришвидшену втому їх матеріалу. Тому питання дослідження динаміки роботи вітроустановки є досить цікавим і актуальним.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженню роботи вітроустановок присвячено досить багато публікацій. У частині з них, наприклад в [1], розглядаються одночасні



обертальні рухи лопатей навколо осей вітроколеса і башти, тобто при орієнтації за напрямком вітру. В інших публікаціях досліджується динаміка обертального руху вітроколеса з різними механізмами регулювання потужності: повороту лопатей [2], або відведенням вітроколеса в сторону [3]. У всіх цих роботах аеромеханічна система вітроустановки має два ступені вільності: в першому випадку – поворот вітроколеса і гондоли, в другому – поворот вітроколеса і лопаті навколо власної поздовжньої осі.

Наукова новизна даної роботи полягає у тому, що на основі проведеного математичного моделювання навантажень лопатей у роботі [4] та вибраних в [5] узагальнених координат для твердотільної підсистеми, які повністю характеризують режими функціонування вітроколеса, здійснено спробу побудувати диференціальні рівняння складного руху лопатей та дослідити динамічну поведінку вітроустановки при змінному характері навантаження на її валу та швидкості й напрямку вітру (в режимі запуску вітроколеса при когерентному пориві).

Формулювання мети досліджень.

Побудувати диференціальні рівняння складного руху лопатей при їх одночасному нерівномірному обертанні навколо трьох осей та дослідити динаміку роботи вітроустановки при когерентних поривах вітру та змінному в часі навантаженні на валу вітроколеса.

Виклад основного матеріалу. Для описання динаміки вітроустановки приймемо узагальнені координати, які були обґрунтовані в [5], а саме: кути повороту гондоли навколо осі башти φ , вітроколеса навколо осі гондоли ψ і лопаті навколо власної поздовжньої осі θ , які повністю характеризують режими функціонування вітроколеса. Таким чином, вітроустановка з механізмами регулювання потужності й орієнтації за напрямком вітру являє собою аеромеханічну систему з трьома ступенями вільності, динаміку якої можна описати системою з трьох диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial \varphi} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{\varphi}} + \frac{\partial E_{II}}{\partial \varphi} &= Q_\varphi; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial \psi} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{\psi}} + \frac{\partial E_{II}}{\partial \psi} &= Q_\psi; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial \theta} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial E_{II}}{\partial \theta} &= Q_\theta, \end{aligned} \quad (1)$$

де E_K , E_{II} – кінетична і потенціальна енергія системи; E_D – дисипативна функція; Q_φ , Q_ψ , Q_θ – узагальнені сили, що відповідають обраним узагальненим координатам φ , ψ , θ , відповідно.

У роботах [4, 5] прийнято низку припущень, які є характерними для роботи тихохідних вітроустановок малої потужності з механізмами регулювання потужності й орієнтації за напрямком повітряного потоку, а саме: 1) геометричні розміри й масові характеристики усіх елементів є постійними і в процесі роботи не змінюються; 2) дисипація енергії в системі здійснюється за рахунок аеродинамічного демпфування і сил тертя; 3) при відцентровому регулюванні центр ваги і центр тиску аеродинамічних сил збігаються з віссю лопаті, тоді як вага самої лопаті по обидва боки від осі забезпечує регульовальний ефект. При аеродинамічному регулюванні центр аеродинамічного тиску знаходиться на деякій відстані від осі лопаті, що спричиняє при зростанні швидкості вітру збільшення поворотного моменту відносно її осі та зміну кута встановлення відносно потоку повітря.

Кінетичну енергію системи E_K представимо у вигляді суми енергій обертальних рухів лопатей E_{K1} , вітроколеса E_{K2} і гондоли E_{K3} :

$$\begin{aligned} E_K &= E_{K1} + E_{K2} + E_{K3}; \\ E_{K1} &= 0.25 \cdot N \cdot m_l \cdot b_l^2 \cdot (\dot{\theta})^2; \\ E_{K2} &= \left(0.5 \cdot N \cdot m_l \cdot (R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2) + \right. \\ &\quad \left. + 0.25 \cdot m_m \cdot (r_m^2 + (r_m - c_m)^2) \right) \cdot (\dot{\psi})^2; \\ E_{K3} &= 0.5 \cdot \left(m_{xв} \cdot l_{xв}^2 + m_m \cdot b_m^2 + \right. \\ &\quad \left. + N \cdot m_l \cdot (b_m^2 + 0.5 \cdot R_l^2) + \right. \\ &\quad \left. + m_e \cdot (d_e^2 + l_e^2 / 12) \right) \cdot (\dot{\varphi})^2, \end{aligned} \quad (2)$$

де N – кількість лопатей; m_l – маса однієї лопаті; b_l – приведена відстань від поздовжньої осі до центру мас півлопаті; R_l – відстань від осі вітроколеса до центру мас лопаті; m_m , r_m , c_m – маса, зовнішній радіус і товщина маточини, відповідно; $m_{xв}$ – маса хвостового стабілізатора; $l_{xв}$ – приведена відстань від центру мас хвостового



стабілізатора до осі башти; b_m – відстань від осі башти до місця кріплення маточини вітроколеса; m_2 , d_2 , l_2 – маса, діаметр і довжина гондоли, відповідно.

Необхідно зазначити, що дисипацією енергії в системі у подальших розрахунках будемо нехтувати у зв'язку з її малістю порівняно із кінематичною і потенціальною енергіями. Остання має місце лише при роботі механізму повороту лопатей, коли в якості регульовального елемента використовується спіральна пружина. Тому врахуємо її при поданні виразу для узагальненої сили Q_θ .

Зовнішні навантаження, які діють на вітроустановку можна розділити на аеродинамічні, гравітаційні та експлуатаційні. Перші виникають внаслідок взаємодії повітряного потоку з рухомими частинами вітроустановки, другі спричиняються силою земного тяжіння, а треті визначаються параметрами під'єданого до валу вітроколеса навантаження. Усі вказані навантаження були детально розглянуті в [4, 5] та інших роботах авторів, тому детальніше на їх аналізі зупинятися не будемо.

Узагальнену силу Q_φ , яка впливає на поворот гондоли, Q_ψ , що спричиняє обертання вітроколеса, і Q_θ , яка виникає при спрацюванні механізму регулювання відбору потужності з потоку повітря, подамо у наступному вигляді:

$$Q_\varphi = 0.5 \cdot \rho_n \cdot S_{xg} \cdot l_{xg} \cdot V(t)^2;$$

$$Q_\psi = -M(t) \cdot (\dot{\psi})^m + 0.5 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_n \cdot V(t)^2 \times \left[\alpha \cdot \frac{\dot{\psi} \cdot R}{V(t)} - \beta \cdot \left(\frac{\dot{\psi} \cdot R}{V(t)} \right)^2 - \gamma \right]; \quad (3)$$

$$Q_\theta = -0.5 \cdot N \cdot C_\theta \cdot \theta^2 + 0.5 \cdot N \cdot b_l \cdot S_l \times \times \rho_n \cdot \left((\dot{\psi})^2 \cdot \left(R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2 \right) + V(t)^2 \right),$$

де ρ_n – густина повітря; S_{xg} – площа хвостового стабілізатора; $V(t)$, $M(t)$ – часові залежності швидкості вітрового потоку та коефіцієнта моменту навантаження на валу вітроколеса; m – показник степеня у залежності моменту навантаження на привідному валу від кутової швидкості його обертання; R – зовнішній радіус вітроколеса; α , β , γ – сталі коефіцієнти, величини яких можна визначити з експериментальних кривих аеродинамічного

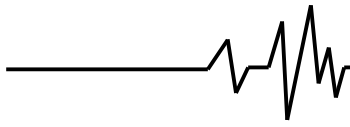
моменту вітроколеса, використовуючи, наприклад, метод найменших квадратів; C_θ – коефіцієнти жорсткості спіральних пружин механізму регулювання; b_l , R_l – приведені відстані від осей лопаті та гондоли, відповідно, до центру аеродинамічного тиску; S_l – ефективна площа аеродинамічного тиску на лопать.

Знайшовши відповідні похідні від виразів (2) та використовуючи залежності (3), побудуємо на основі системи диференціальних рівнянь (1) математичну модель динаміки довільного лопатевого горизонтально-осьового вітроколеса:

$$\begin{aligned} & \left(m_{xg} \cdot l_{xg}^2 + m_m \cdot b_m^2 + \right. \\ & \left. + N \cdot m_l \cdot (b_m^2 + 0.5 \cdot R_l^2) + \right) \cdot \ddot{\varphi} = \\ & \left. + m_2 \cdot (d_2^2 + l_2^2 / 12) \right) \\ & = 0.5 \cdot \rho_n \cdot S_{xg} \cdot l_{xg} \cdot V(t)^2; \\ & \left(0.5 \cdot N \cdot m_l \cdot (R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2) + \right) \cdot \ddot{\psi} + \\ & \left. + 0.25 \cdot m_m \cdot (r_m^2 + (r_m - c_m)^2) \right) \\ & + 2 \cdot N \cdot m_l \cdot b_l^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta} = \quad (4) \\ & = -M(t) \cdot (\dot{\psi})^m + 0.5 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_n \cdot V(t)^2 \times \\ & \times \left[\alpha \cdot (\dot{\psi} \cdot R / V(t)) - \beta \cdot (\dot{\psi} \cdot R / V(t))^2 - \gamma \right]; \\ & N \cdot m_l \cdot b_l^2 \cdot \left(0.5 \cdot \ddot{\theta} - (\dot{\psi})^2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \right) = \\ & = -0.5 \cdot N \cdot C_\theta \cdot \theta^2 + 0.5 \cdot N \cdot b_l \cdot S_l \times \\ & \times \rho_n \cdot \left((\dot{\psi})^2 \cdot \left(R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2 \right) + V(t)^2 \right). \end{aligned}$$

На основі математичної моделі (4) проаналізуємо характер протікання перехідних процесів при роботі вітроустановки в різних експлуатаційних умовах.

Раптова зміна моменту навантаження при сталій швидкості вітру. Припустимо, що під час роботи вітроустановки при постійній швидкості вітру момент навантаження раптово збільшився і протягом всього періоду перехідного процесу залишився сталим. При цьому, як бачимо із рис. 1, має місце послідовний скачок кута встановлення лопатей у бік збільшення, а кутової швидкості – у бік



зменшення. Протягом певного проміжку часу спостерігається поступове згасання перехідного процесу і рух системи стабілізується. В залежності від швидкості повітряного потоку і величини навантаження, частота обертання вітроколеса після раптового зростання моменту навантаження і завершення перехідного процесу може зменшитися, або ж залишитися на тому ж рівні. Кут положення лопатей відносно площини обертання вітроколеса при зростанні моменту навантаження постійно зростає. Якщо б у конструкції вітроустановки не була передбачена система повороту лопатей, то кутова швидкість ротора різко зменшувалася б.

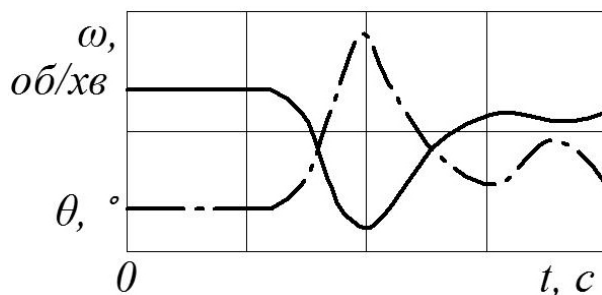


Рис. 1. Характеристики перехідного процесу при раптовому збільшенні моменту навантаження

Раптова зміна швидкості вітру при сталому моменті навантаження. Припустимо, що швидкість вітру раптово збільшується на деяку величину і надалі залишається постійною протягом усього перехідного процесу при незмінному значенні моменту навантаження. При цьому, як бачимо із рис. 2, має місце послідовний скачок кута встановлення лопатей у бік зменшення, а кутової швидкості – у бік збільшення. Протягом певного проміжку часу спостерігається поступове згасання перехідного процесу і рух системи стабілізується. В залежності від швидкості повітряного потоку і величини навантаження, частота обертання вітроколеса після раптового зростання моменту навантаження і завершення перехідного процесу може збільшитися, або ж залишитися на тому ж рівні. Кут положення лопатей відносно площини обертання вітроколеса при зростанні моменту навантаження постійно зменшується. Якщо б у конструкції вітроустановки не була передбачена система повороту лопатей, то кутова швидкість ротора різко збільшувалася б зі збільшенням швидкості повітряного потоку, що могло б спричинити вихід з ладу як окремих елементів, так і вітроустановки в цілому.

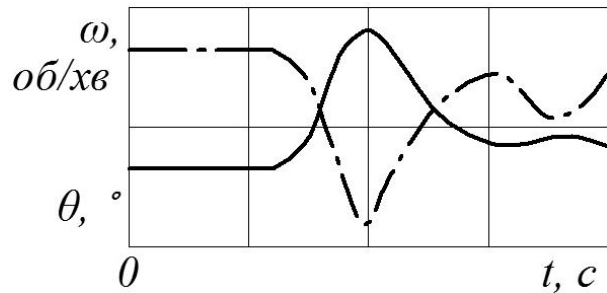


Рис. 2. Характеристики перехідного процесу при раптовому збільшенні швидкості повітряного потоку

Періодична зміна швидкості вітру при сталому моменті навантаження на валу вітроколеса та одночасна зміна швидкості вітру і моменту навантаження будуть проаналізовані у подальших етапах досліджень.

Висновок. У статті доведено актуальність проблем енергозбереження та якомога ширшого залучення нетрадиційних джерел енергії у сільськогосподарський комплекс нашої держави, обґрунтовано актуальність подальших досліджень та удосконалень техніки й технологій у галузі малої вітроенергетики, наведено математичну модель динаміки лопатевої горизонтально-осьової вітроустановки та проаналізовано перехідні процеси, які можуть виникати при її роботі, а саме раптову зміну моменту навантаження на валу вітроколеса при сталій швидкості вітру та раптову зміну швидкості вітру при сталому моменті навантаження. Побудовано відповідні графічні залежності та зроблено висновки про параметри руху системи у перехідних режимах.

Проаналізувавши отримані результати моделювання руху системи, можемо констатувати, що перехідні процеси раптового зменшення швидкості вітру та збільшення моменту навантаження матимуть схожий характер, а саме спричинятимуть зростання кута відхилення лопаті й зменшення кутової швидкості обертання вітроколеса. Аналогічно, можна зробити висновок про схожість перехідних процесів раптового зростання швидкості вітру та зменшення моменту навантаження.

У подальших етапах досліджень планується врахувати втрати (дисипацію) енергії у вітроустановці за рахунок сил тертя й аеродинамічного демпфування та проаналізувати перехідні режими її роботи при періодичній зміні швидкості вітру і постійному моменті навантаження й одночасній зміні швидкості й моменту навантаження.

**Література**

1. Худолій С.М. Коливання подовжених криволінійних закручених стержнів при складному обертанні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.17 «Будівельна механіка» / С.М. Худолій. – Київ, 2006. – 20 с.

2. Коханевич В.П. Вплив параметрів відцентрового регулятора ротора на статичні та динамічні характеристики вітроустановок малої потужності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / В.П. Коханевич. – Київ, 2010. – 17 с.

3. Легошин Д.В. Енергетична ефективність автономної вітроелектроустановки зі стабілізацією частоти ротора за умов косого обдування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / Д.В. Легошин. – Київ, 2012. – 20 с.

4. Кузьо І.В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Наукові нотатки. – 2011. – № 33. – С. 115-123.

5. Корендій В.М. Коливні процеси лопатей вітроустановок / В.М. Корендій // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 1 (65). – С. 5-10.