

УДК 621.548

В.М. КОРЕНДІЙ, І.В. КУЗЬО

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра механіки та автоматизації машинобудування

ДИНАМІКА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОКОЛЕСА ЗА РАХУНОК ЗМІНИ КУТА АТАКИ ЛОПАТЕЙ

© Корендій В.М., Кузьо І.В., 2012

На основі спрощеної кінематичної схеми горизонтально-осьової вітроустановки з механізмом зміни кута атаки лопатей побудовано диференціальне рівняння їх обертального руху за дії аеродинамічних, інерційних і гравітаційних сил та моменту регулювання. Визначення параметрів руху та побудова відповідних часових діаграм проводилися з урахуванням змінної у часі швидкості повітряного потоку.

The differential equation of blade rotational motion under the influence of aerodynamic, inertial and gravitational forces and regulation moment was built on the basis of the simplified kinematic scheme of horizontal axis wind turbine with the mechanism of change of blades attack angle.

The determination of motion parameters and the construction of appropriate time diagrams were realized taking into consideration time dependencies of wind-flow speed.

Постановка проблеми. Питання запровадження енергоощадних технологій та залучення альтернативних джерел енергії в усі сфери суспільного життя є доволі актуальним сьогодні. У системі енергозабезпечення промислових та сільськогосподарських виробництв необхідно істотно збільшувати обсяги використання відновлюваної енергії, зокрема вітрової, яка традиційно застосовувалася у господарстві нашої країни протягом багатьох століть. Однак для більшості території України середньорічна швидкість вітру становить 4–5 м/с, за якої, за висновками багатьох дослідників, використання вітроустановок вважається недоцільним [1]. Все ж багатовіковий досвід використання вітряків у сільській місцевості спростовує такі однозначні висновки. Саме на клас тихохідних вітроустановок малої потужності звернув увагу німецький учений і практик Хайнц Шульц, вважаючи їх найоптимальнішими для використання у сільській місцевості (водонапірні й зрошувальні системи, розмелювання зерна, нарізка кормів, розпилювання деревини тощо) [1]. Однак в Україні їх виробництво фактично відсутнє.

Більшість механізмів, які використовують як привід вітроколеса, вимагають сталої частоти обертання привідного вала з метою забезпечення оптимального режиму роботи. Мінливість швидкості і напрямку вітрового потоку дещо ускладнює можливості його використання. Тому у вітроустановках застосовують спеціальні системи орієнтації (наприклад, за допомогою хвостового стабілізатора) та стабілізації кутової швидкості ротора, найпоширенішою серед яких є зміна кута атаки лопатей стосовно напрямку потоку повітря. Конструкції таких систем мають багато різновидів (інерційні, аеродинамічні, приводом від електродвигуна чи гідроциліндра) і постійно удосконалюються. Однак залишаються поза увагою динамічні чинники впливу їх використання на міцність і надійність елементів вітроустановки, зокрема лопатей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітроустановки почали масово використовуватися з другої половини ХХ ст. Саме тому протягом останніх кількох десятиріч можна спостерігати активний розвиток методик їх розрахунку та проектування, оновлення конструкцій, удосконалення математичних та комп'ютерних моделей тощо. Аналізуючи сучасний стан досліджень динаміки вітроустановок, можемо виділити три актуальні питання, які виникають під час моделювання роботи ВУ [2]: 1) адекватна математична інтерпретація мінливості напрямку і швидкості

повітряного потоку та їх вплив на елементи та системи вітроустановки; 2) врахування перехідних процесів, які виникають під час експлуатації ВУ (запуск, екстрена зупинка, когерентні пориви вітру); 3) аналіз динамічної поведінки лопатей під час використання механізмів регулювання кутової швидкості вітроколеса. Перше питання розглядають багато публікацій [3, 4, 7], тоді як друге і третє залишаються сьогодні ще недостатньо вивченими [5].

Формулювання цілі роботи. Побудувати диференціальне рівняння руху та проаналізувати динамічну поведінку вітроколеса під час використання механізму зміни кута атаки лопатей внаслідок дії на них змінних у часі аеродинамічних, інерційних та гравітаційних навантажень.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо вітроустановку, принципову схему якої зображено на рис. 1, а. Типова ВУ складається із фундаменту, башти, гондоли, хвостової частини і вітроколеса з лопатями. Під час побудови кінематичної схеми вітроустановки зобразимо башту і гондолу у вигляді однорідних абсолютно жорстких циліндрів круглого поперечного перерізу, вітроколесо – у вигляді абсолютно жорсткого диска і зосереджених на невагомих стрижнях мас лопатей m_l , а хвостову частину – у вигляді зосередженої на протилежному від вітроколеса кінці гондоли маси $m_{хв}$. Також припускаємо, що башта жорстко заземлена у фундаменті, хвостова частина нерухомо прикріплена до гондоли, а всі інші пари елементів (башта-гондола, гондола-вітроколесо, вітроколесо-вісь лопаті) з'єднані між собою за допомогою нерухомих циліндричних шарнірів. Отже, внаслідок взаємодії потоку повітря з лопатями вітроколесо має можливість обертатися навколо поздовжньої осі гондоли, яка, своєю чергою, за зміни напрямку вітру за рахунок хвостового стабілізатора повертається навколо поздовжньої осі башти. Для забезпечення сталої частоти обертання вітроколеса у більшості вітроустановок малої потужності використовують механізми повороту лопатей (механізми зміни кута атаки). У цьому випадку центр мас лопаті зміщений стосовно її поздовжньої осі на деяку величину b_l , а поворот лопаті навколо цієї осі обмежується жорсткістю пружини, яка знаходиться в шарнірі кріплення лопаті до маточини вітроколеса. Кінематичну схему вітроустановки за складного руху лопатей (обертання навколо трьох осей) зображено на рис. 1, б.

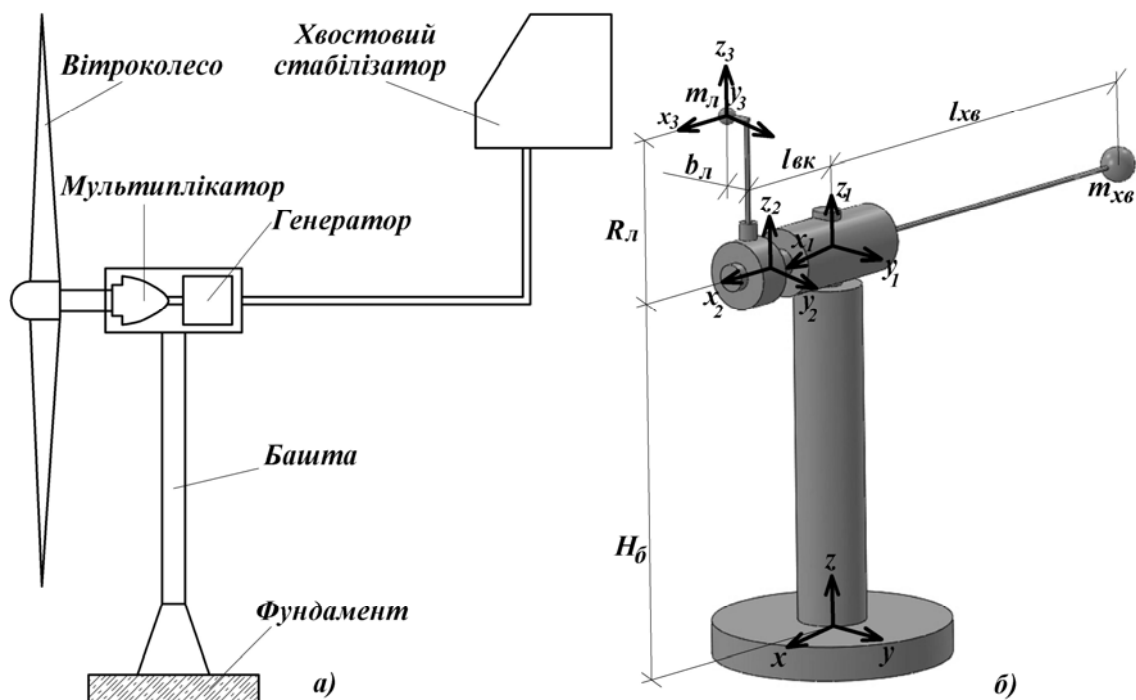


Рис. 1. Принципова (а) та кінематична (б) схеми вітроустановки

Інерційну систему координат $Oxyz$ розмістимо на фундаменті так, щоб вісь Oz збігалась з поздовжньою віссю башти, а Ox і Oy утворювали горизонтальну площину (рис. 1, б). Система координат $O_1x_1y_1z_1$ прив'язана до шарніра, який з'єднує башту і гондолу, причому вісь O_1z_1 дотична до поздовжньої осі башти, а осі O_1x_1 і O_1y_1 утворюють площину обертання гондoli і співнапрямлені з Ox і Oy відповідно. Система координат $O_2x_2y_2z_2$ прив'язана до шарніра, який з'єднує гондолу і вітроколесо, причому вісь O_2x_2 збігається з поздовжньою віссю гондoli, а O_2z_2 співнапрямлена з O_1z_1 і Oz . Систему координат $O_3x_3y_3z_3$ розміщуємо у місці розміщення зосередженої маси лопаті m_n так, щоб вісь O_3z_3 була паралельною до осі лопаті, а вісь O_3x_3 – співнапрямленою з O_2x_2 . Аналізуючи отриману кінематичну схему, можемо зробити висновок, що система має три ступені вільності, одним із яких є обертання лопаті навколо власної поздовжньої осі, тому за узагальнену координату виберемо відповідний кут повороту θ . Прийmemo, що у початковому положенні системи площина $O_3y_3z_3$ збігається з площиною обертання вітроколеса $O_2y_2z_2$, а внаслідок повороту лопаті кут між ними змінився на деяку величину θ . Для описання руху системи використаємо диференціальне рівняння Лагранжа другого роду у такому вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial \theta} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial E_{II}}{\partial \theta} = Q_\theta, \quad (1)$$

де E_K , E_D , E_{II} – кінетична, дисипативна і потенціальна енергії системи відповідно; Q_θ – узагальнена сили, що відповідає обраній узагальненій координаті θ .

Враховуючи припущення про те, що система складається із абсолютно жорстких тіл та ідеальних в'язей, які їх з'єднують, а також нехтуючи опором повітря під час повороту лопатей вітроколеса, можна одразу записати $E_D = 0$. Кінетичну енергію системи в обертальному русі визначимо із такої залежності:

$$E_K = 0.5 \cdot I_{Z_2} \cdot \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = 0.5 \cdot I_{Z_2} \cdot (\dot{\theta})^2, \quad (2)$$

де I_{Z_2} – момент інерції лопаті (зосередженої маси m_n) стосовно осі O_2z_2 .

Потенціальна енергія системи зростатиме під час закручування пружини механізму регулювання, тобто за збільшення кута повороту лопаті стосовно початкового положення:

$$E_{II} = 0.5 \cdot C_\theta \cdot \theta^2, \quad (3)$$

де C_θ – коефіцієнт жорсткості спіральної пружини під час закручування.

Для визначення членів лівої частини рівняння (1) знайдемо відповідні похідні від виразів (2) і (3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_K}{\partial \dot{\theta}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left(0.5 \cdot I_{Z_2} \cdot (\dot{\theta})^2 \right) = I_{Z_2} \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{d}{dt} \left(I_{Z_2} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right) = I_{Z_2} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = I_{Z_2} \cdot \ddot{\theta}, \\ \frac{\partial E_{II}}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left(0.5 \cdot C_\theta \cdot \theta^2 \right) = C_\theta \cdot \theta. \end{aligned} \quad (4)$$

Момент інерції системи стосовно осі O_2z_2 залежить від величини і розміщення стосовно поздовжньої осі лопаті її зосередженої (приведеної) маси m_n . На масу лопаті впливають такі чинники як потужність вітроустановки, геометричні параметри ротора тощо. Із достатньою для інженерних розрахунків точністю I_{Z_2} можемо визначити із такої залежності:

$$I_{Z_2} = m_n \cdot b_n^2, \quad (5)$$

де b_n – приведена відстань від осі обертання до центра мас лопаті.

Зовнішні сили, які діють на вітроустановку, можна розділити на аеродинамічні, інерційні та гравітаційні. Спершу проаналізуємо дію аеродинамічних навантажень. Лопатеве вітроколесо працює за рахунок сили \vec{F}_Σ , яка виникає під час набігання на лопаті повітряного потоку. Силу \vec{F}_Σ можна розкласти на дві складові: силу \vec{F}_y , що перпендикулярна до потоку, і силу \vec{F}_x – напрямлену вздовж потоку повітря. Силу \vec{F}_y називають аеродинамічною підйомною силою, а силу \vec{F}_x – силою аеродинамічного профільного опору лопаті. Підйомна сила \vec{F}_y виконує корисну механічну роботу (обертання ВК), сила ж \vec{F}_x , навпаки, спричиняє втрати енергії повітряного потоку. Співвідношення між \vec{F}_y і \vec{F}_x переважно залежить від форми поперечного перерізу лопаті і кута α_n нахилу його поверхні до напрямку потоку повітря [7].

На рис. 2 зображено векторну діаграму швидкостей та аеродинамічних сил для поперечного перерізу лопаті вітрового колеса з горизонтальною віссю обертання. Горизонтальна вісь умовно являє собою вісь обертання вітроколеса. Вона збігається з напрямком вітру, позначеним вектором \vec{V}_n . Вертикальна вісь умовно позначає площину обертання вітроколеса. Напрямки аеродинамічних сил, які виникають на деякій елементарній ділянці лопаті, показано векторами \vec{F}_Σ , \vec{F}_x , \vec{F}_y , \vec{F}_l , \vec{F}_m [7]. Кут α_r позначає кут між хордою лопаті і площиною обертання вітроколеса; α_n – кут атаки повітряного потоку, який набігає на елемент лопаті зі швидкістю \vec{W}_B ; β – кут між напрямком швидкості повітряного потоку \vec{W}_B і площиною обертання вітроколеса; \vec{V}_n – швидкість вітру за наближення до площини обертання вітроколеса; \vec{W}_B – швидкість вітрового потоку, який набігає на ділянку лопаті під час обертання вітроколеса; $\vec{\omega}r$ – колова швидкість елементарної ділянки лопаті ($r = R_n^2 + (b_n \cdot \cos \theta)^2$); \vec{F}_Σ – сумарна сила, що виникає на ділянці лопаті під час набігання повітряного потоку, яка розкладається на підйомну силу \vec{F}_y і силу аеродинамічного профільного опору \vec{F}_x . Сумарну силу \vec{F}_Σ можна розкласти також на силу лобового тиску \vec{F}_l і тягову силу \vec{F}_m у випадку, коли вітроколесо нерухоме. Сила \vec{F}_m , що діє на ділянку лопаті в площині обертання вітроколеса, породжує при цьому обертювий момент, який приводить його у рух.

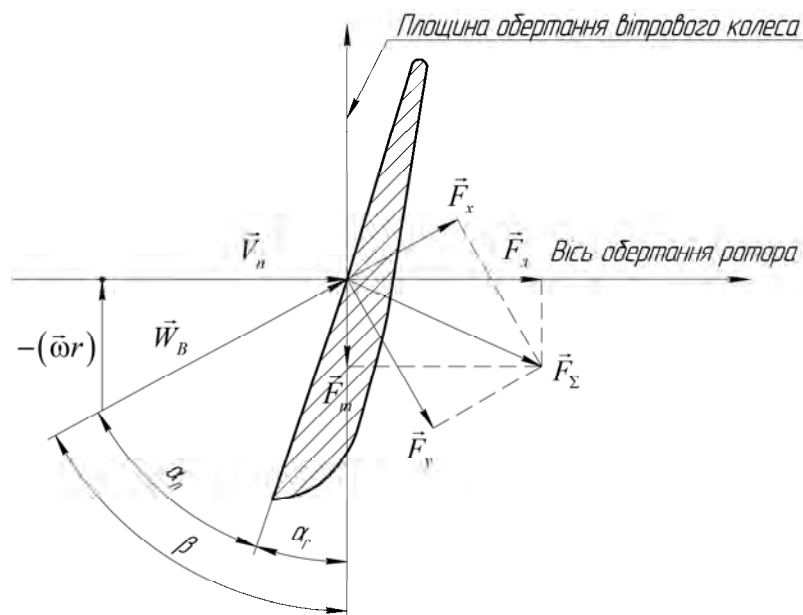


Рис. 2. Векторна діаграма швидкостей та аеродинамічних сил для поперечного перерізу лопаті вітроколеса з горизонтальною віссю обертання

Сумарну силу \vec{F}_Σ , з якою повітряний потік діє на площину лопаті, можна визначити із такого співвідношення [7]:

$$F_\Sigma = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \approx 0.5 \cdot \rho_n \cdot S \cdot (\omega^2 \cdot r^2 + V_n^2), \quad (6)$$

де ρ_n – густина повітря; S – площа лобової поверхні лопаті, яка за довжини лопаті l_p і ширини середнього поперечного перерізу d_p дорівнюватиме $S \approx n \cdot l_p \cdot d_p$. Коефіцієнт n враховує несиметричність розміщення осі лопаті і дорівнює відношенню різниці між лобовими поверхнями лопаті по обидва боки від осі до її загальної площі ($n \approx 0.5 \dots 0.75$).

Оскільки центр мас лопаті дещо зміщений стосовно її поздовжньої осі, то аеродинамічна сила під час повороту створюватиме обертовий момент M_p :

$$M_p = b_l \cdot F_\Sigma \approx 0.5 \cdot n \cdot b_l \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \cdot (\omega^2 \cdot r^2 + V_n^2). \quad (7)$$

Коливання швидкості й напрямку вітру мають випадковий характер, а їх статистичні характеристики відомі доволі наближено. На рис. 3 зображено типові для території Прикарпаття часові залежності зміни швидкості (а) та напрямку (б) вітрового потоку [3]. Як бачимо, протягом однієї секунди вітер здатний змінити свій напрямок більш ніж на 90° , а швидкість – на 40–60 % від номінального значення V_H . Тому для забезпечення перпендикулярності напрямку повітряного потоку до площини обертання вітроколеса застосовують системи орієнтації, які у переважній більшості вітроустановок малої потужності виконуються у вигляді хвостового стабілізатора (рис. 1, а). Отже, можемо припустити, що система орієнтації працює із достатньою ефективністю і вісь обертання вітроколеса завжди паралельна до напрямку потоку повітря.

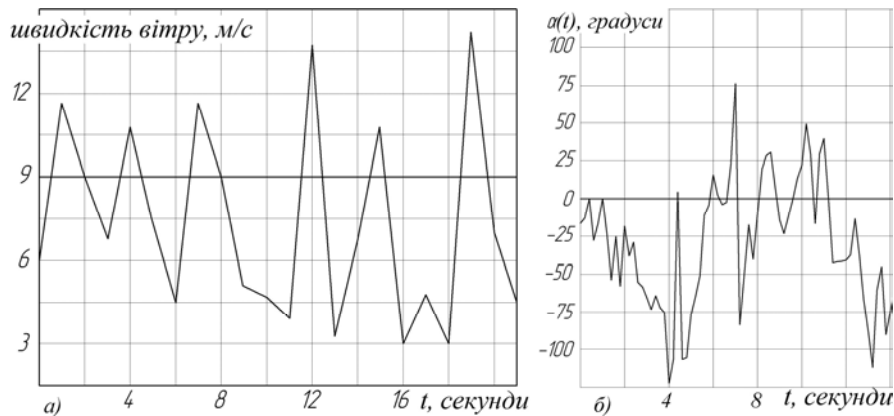


Рис. 3. Часові залежності зміни швидкості і напрямку повітряного потоку

Для подальшого аналізу подамо швидкість вітру V_n у вигляді періодичної функції:

$$V_n = V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t), \quad (8)$$

де s і k – коефіцієнти величини і періодичності пульсації швидкості вітру відповідно. Для розрахунків прийматимемо $s = 0.2 \dots 0.6$, $k = 0.5 \dots 1$.

Отже, вплив аеродинамічних сил на поворот лопаті можемо описати залежністю:

$$M_p = 0.5 \cdot n \cdot b_l \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \cdot \left(\omega^2 \cdot r^2 + (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \right). \quad (9)$$

Максимальний вплив гравітаційних навантажень на поворот лопаті відбуватиметься за горизонтального положення її осі за $\theta = 90^\circ$ [2]. Відповідний обертовий момент можемо записати так:

$$M_g = m_l \cdot g \cdot b_l \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta), \quad (10)$$

де ψ – кут відхилення поздовжньої осі лопаті від вертикального положення під час обертання ВК.

Відцентрові та дотичні інерційні навантаження, які діють на лопать вітроустановки та впливають на зміну узагальненої координати θ , виникають за нерівномірного обертання гондоли навколо поздовжньої осі башти та вітроколеса навколо осі гондоли [2, 7]. Їх сумарну дію можна описати такою залежністю:

$$M_{in} = m_l \cdot b_l \cdot \left(\dot{\varphi}^2 \cdot (l_{BK} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot \cos \theta + \ddot{\varphi} \cdot (l_{BK} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot \sin \theta + \ddot{\psi} \cdot R_l \cdot \sin \theta \right), \quad (11)$$

де $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ – кутові швидкість і пришвидшення обертання гондоли; l_{BK} – відстань від осі башти до осі лопаті; R_l – відстань від осі гондоли до центра мас лопаті; $\ddot{\psi}$ – кутове пришвидшення вітроколеса.

Коріолісові сили інерції виникають за одночасного обертання гондоли і вітроколеса, гондоли і лопаті, вітроколеса і лопаті. У першому і другому випадках переносним 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 [2, 7] та інших роботах. У напрямі руху лопаті діє лише коріолісова сила інерції за одночасного обертання гондоли і вітроколеса, а її вплив можна описати такою залежністю:

$$M_{cor} = 2 \cdot m_l \cdot \dot{\varphi} \cdot \ddot{\psi} \cdot \sqrt{R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi \cdot b_l \cdot \cos \theta, \quad (12)$$

де $\dot{\psi} = \omega$ – кутова швидкість обертання вітроколеса.

Отже, узагальнену силу Q_θ , з урахуванням рівнянь (9), (10), (11) і (12), можемо подати у такому вигляді:

$$Q_\theta = M_p + M_g + M_{in} + M_{cor} = 0.5 \cdot n \cdot b_l \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \cdot \left[\begin{aligned} & \left((\dot{\psi})^2 \cdot \left(R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2 \right) + \right. \\ & \left. + (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \right) + \end{aligned} \right] + \quad (13)$$

$$+ m_l \cdot g \cdot b_l \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) + m_l \cdot \left[\begin{aligned} & \dot{\varphi}^2 \cdot (l_{BK} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot b_l \cdot \cos \theta + \\ & + \ddot{\varphi} \cdot (l_{BK} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot b_l \cdot \sin \theta + \ddot{\psi} \cdot R_l \cdot b_l \cdot \sin \theta \end{aligned} \right] +$$

$$+ 2 \cdot m_l \cdot \dot{\varphi} \cdot \ddot{\psi} \cdot \sqrt{R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi \cdot b_l \cdot \cos \theta.$$

Підставляючи вирази (3), (4), (5) і (13) у рівняння (1), отримаємо диференціальне рівняння обертального руху лопаті:

$$m_l \cdot b_l^2 \cdot \ddot{\theta} + C_\theta \cdot \dot{\theta} = 0.5 \cdot n \cdot b_l \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \cdot \left[\begin{aligned} & \left((\dot{\psi})^2 \cdot \left(R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2 \right) + \right. \\ & \left. + (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \right) + \end{aligned} \right] + \quad (14)$$

$$+ m_l \cdot g \cdot b_l \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) + m_l \cdot \left[\begin{aligned} & \dot{\varphi}^2 \cdot (l_{BK} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot b_l \cdot \cos \theta + \\ & + \ddot{\varphi} \cdot (l_{BK} + b_l \cdot \sin \theta) \cdot b_l \cdot \sin \theta + \ddot{\psi} \cdot R_l \cdot b_l \cdot \sin \theta \end{aligned} \right] +$$

$$+ 2 \cdot m_l \cdot \dot{\varphi} \cdot \ddot{\psi} \cdot \sqrt{R_l^2 + (b_l \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi \cdot b_l \cdot \cos \theta.$$

Рівняння (14) являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами. Для його чисельного розв'язування та подання результатів у графічному вигляді використаємо програмний комплекс МАТЕМАТИКА. У таблиці задано початкові умови та вибрано основні геометричні розміри й параметри руху вітроустановки (нерівномірне обертання гондоли, вітроколеса і лопаті) з метою забезпечення її номінальної потужності 3 кВт за розрахункового значення швидкості вітру $V_H = 9 \text{ м/с}$.

$\theta(0), \text{ рад}$	$\dot{\theta}(0), \text{ рад/с}$	$m_l, \text{ кг}$	$l_p \approx 2 \cdot R_l, \text{ м}$	$\dot{\varphi}, \text{ рад/с}$	$\ddot{\varphi}, \text{ рад/с}^2$	$b_l, \text{ м}$	$d_p, \text{ м}$
0	0	20	2.5	2	0.2	0.1	0.25
$\ddot{\psi}, \text{ рад/с}^2$		$\dot{\psi}, \text{ рад/с}$		$l_{BK}, \text{ м}$	s	k	n
1		100		1	0.6	1	0.65

На основі рівняння (9), даних таблиці та часової діаграми зміни швидкості вітру побудуємо на рис. 4 графічні залежності кута відхилення лопаті вітроколеса для різних значень коефіцієнта жорсткості C_θ : $C_\theta = 4000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ (штрихова лінія) і $C_\theta = 10000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ (суцільна лінія).

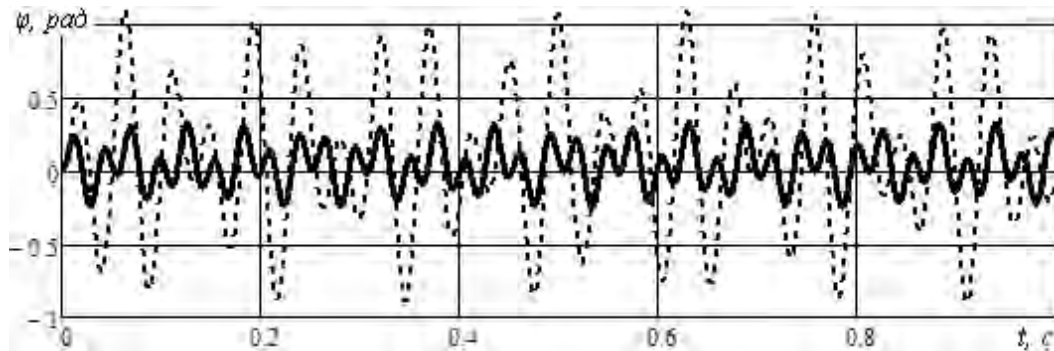


Рис. 4. Часові залежності кута відхилення лопаті за різних значень жорсткості пружини

Висновки. У роботі розглянуто питання обертального руху лопаті за поривчастих вітрів за умови використання в конструкції вітроколеса спеціального механізму регулювання її кута атаки. Побудова диференціального рівняння руху проводилася на основі принципів аналітичної механіки з урахуванням мінливості швидкості вітрового потоку для різних значень жорсткості поворотної пружини. Отримані результати дають змогу зробити такі висновки: 1) за поривчастого вітру та внаслідок дії змінних у часі аеродинамічних, інерційних та гравітаційних сил лопать вітроколеса при використанні в його конструкції механізму регулювання її кута атаки постійно обертається навколо власної осі; 2) амплітуда коливань кута відхилення лопаті залежить переважно від величини навантажень на лопать та жорсткості поворотної пружини механізму регулювання (за збільшення навантаження чи зменшення жорсткості вона зростає (рис. 4)); 3) для кожного навантаження на лопать існує певний оптимальний кут її відхилення, який забезпечується механізмом регулювання залежно від частоти обертання та моменту навантаження на валу вітроколеса. Саме тому актуальним завданням сьогодні є моделювання режимів роботи вітроустановок за поривчастих вітрів, дослідження й забезпечення оптимального функціонування механізму зміни кута атаки лопатей з метою забезпечення максимального відбору потужності з потоків повітря і стабілізації кутової швидкості обертання вітроколеса.

На основі проведеного аналізу динаміки механізму повороту лопатей у подальших етапах досліджень планується доповнити (уточнити) існуючі математичні моделі горизонтально-осьових вітроустановок, які використовують у своїй конструкції механічні системи повороту лопатей (пружинні регулятори) та проаналізувати можливості оптимізації їх роботи.

1. Кузьо І.В. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2010. – № 679. – С. 61–68.
2. 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 (36). – С. 52–57.
3. Hodges D. Multi-Flexible-Body Analysis for Application to Wind-Turbine Control Design / D. Hodges, M. Patil // Proceedings of the ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, January, 2001. – P. 281–300.
4. Швень Н.І. Про вплив зміни методик спостережень на визначення напрямку та швидкості вітру на метеорологічній мережі України / Н.І. Швень // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2004. – № 253. – С. 164–172.
5. Кузьо І.В. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – № 3. – С. 85–94.
6. Дзензерский В.А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с.
7. Кузьо І.В. Аналіз аеродинамічних та інерційних навантажень тихохідного вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій, Н.І. Прокопець // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2011. – № 701. – С. 43–50.