

температури при програванні в течение восьми – на 19%, а отличие в температуре при восьми часовом эксперименте от двадцати четырех часового – 6%, т.е. после восьми часов програванія на сушке сталь-ковш близок к стационарному значению распределения температуры в футеровке. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности снижения на 29% минимально рекомендуемого времени програванія сталь-ковша перед вводом его в эксплуатацию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. В., Болонов Н. И. Основы тепло-массопереноса и тепло-физика замкнутых объемов. Донецк : ДонНУ, 2003. 134 с.
2. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. Л. Машиностроение. — 1976. 504 с.

пост.07.06.12

## Моделювання складного руху лопатей вітроколеса

*В. М. КОРЕНДІЙ*

Національний університет «Львівська політехніка»

З метою визначення параметрів складного руху лопатей вітроколеса при орієнтації гондоли за напрямком вітру та повороті механізму регулювання потужності на основі рівнянь Лагранжа другого роду побудовано диференціальні рівняння руху лопатей. Визначення узагальнених сил проводилося з урахуванням знакозмінних аеродинамічних, інерційних та гравітаційних навантажень. За допомогою програмного комплексу Mathematica побудовано часові залежності кутових швидкостей обертання лопатей навколо кожної з осей: вітроколеса, башти і механізму регулювання. На основі аналізу отриманих графічних залежностей обґрунтовано доцільність і актуальність подальших досліджень динамічної поведінки лопатей горизонтально-осьових вітроустановок.

С целью определения параметров сложного движения лопастей ветроколеса при ориентации гондолы за направлением ветра и повороте механизма регулирования мощности на основе уравнений Лагранжа второго рода построены дифференциальные уравнения движения лопастей. Определение обобщенных сил проводилось с учетом знакопеременных аэродинамических, инерционных и гравитационных нагрузок. С помощью программного комплекса Mathematica построены часовые зависимости угловых скоростей вращения лопастей вокруг каждой из осей: ветроколеса, башни и механизма регулирования. На основе анализа полученных графических зависимостей обоснована целесообразность и актуальность дальнейших исследований динамического поведения лопастей горизонтально-осевых ветроустановок.

Differential equations of blades motion are built on the basis of Lagrange second order equations with the purpose of determination of compound motion parameters of wind-wheel blades under the nacelle orientation after the wind direction and turning of the mechanism of power regulation. Generalized forces determination was carried out taking into account alternating aerodynamic, inertial and gravitational loadings. Time dependences of angular velocities of blades rotation round each of the axis: wind-wheel, tower and regulation mechanism are built by means of programmatic complex Mathematica. The expediency and currency of further investigations of dynamic behavior of blades of horizontal-axis wind turbines are substantiated on the basis of analysis of received graphical dependencies.

**Вступ.** На даний час проблема взаємодії енергетики і довкілля набуває загрозливих ознак, негативно впливаючи на атмосферу, гідросферу і біосферу Землі. «Теплове забруднення» планети, «парниковий ефект», «кисневе голодування», кислотні дощі, виснаження озонового шару, масштабні забруднення токсичними хімічними речовинами і радіонуклідами, швидке скорочення біологічної різноманітності – і це ще не повний перелік глобальних проблем, які у значній мірі спричинені видобуванням і споживанням традиційних джерел енергії (вугілля, нафти, природного газу, збагаченого урану тощо).

На сучасному етапі розвитку вітроенергетика є однією з найперспективніших і найбільш екологічно чистих галузей нетрадиційної енергетики. За прогнозами експертів за декілька років енергія повітряних потоків забезпечуватиме до 15 % сумарних енергетичних потреб населення Європейського Союзу. При цьому актуальним є поєднання установок, що перетворюють енергію вітру у комплексі з іншими відновлюваними джерелами (сонця, біомаси, морських

хвиль, річок тощо). Таким чином вдасться зменшити негативний вплив традиційної енергетики на екологію окремих районів, а з плином часу і зовсім відмовитися від використання атомної і теплової енергії.

І хоча технології використання енергії вітру стають усе ефективнішими і досконалішими, все ж залишається досить багато нерозв'язаних проблем, які залишаються досить актуальними на даний час і вимагають якнайшвидшого вирішення. Однією із таких проблем є забезпечення дешевою механічною енергією сільськогосподарських споживачів (зрошення полів, перемелювання зерна, подрібнення кормів, вентиляція складських і підвальних приміщень тощо). Ця проблема загострюється ще й тим фактом, що у нашій країні ми не можемо сповна використовувати світовий досвід виробництва вітроенергетичного обладнання, зважаючи на низьку питому потужність повітряних потоків на території України.

Тому актуальними завданнями розбудови енергетичного сектору нашої держави є розвиток новітніх методик розрахунку та удосконалення

Мат. мод. № 2 (27), 2012

конструкцій тихохідних горизонтально-осьових вітроустановок (ВУ) малої потужності (до 20-30 кВт), які в сукупності з іншими видами відновлюваних джерел енергії здатні практично повністю забезпечити потреби фермерів, сільськогосподарських підприємств та індивідуальних власників дачних ділянок.

Моделюванню роботи та дослідженню динаміки горизонтально-осьових вітроустановок присвячено досить багато наукової літератури [1, 5, 6], однак залишаються недостатньо вивченими механізми ефективного регулювання потужності шляхом повороту лопатей навколо власних поздовжніх осей. При використанні цих механізмів лопаті мають можливість одночасно нерівномірно обертатися навколо трьох осей, що значно ускладнює можливість адекватного математичного опису руху системи [2, 4], оскільки поряд із змінними в часі аеродинамічними та гравітаційними силами, на лопаті впливають відцентрові, дотичні та коріолісові сили інерції. Саме тому в роботі [3] розпочато і в даній статті продовжено дослідження динаміки лопатей з метою встановлення впливу вказаних навантажень на рух вітроколеса.

**Виклад основного матеріалу.** Методику дослідження динаміки ВУ будемо базувати на наступному принципі: вітроустановка розглядається як система із твердими і пружними тілами та ідеальними в'язями, які їх з'єднують. На рис. 1, а) подана принципова схема ВУ, згідно якої твердо-тільна підсистема складається із фундаменту, башти, гондоли і маточина вітроколеса, до якої приєднані лопаті. Башта жорстко защемлена у фундаменті, а всі інші пари елементів (башта-гондола-маточина вітроколеса-лопать) з'єднані між собою за допомогою нерухомих циліндричних шарнірів. Таким чином гондола може обертатися навколо осі башти у горизонтальній площині, вітроколесо – навколо осі гондоли у вертикальній площині, а лопать – навколо власної осі. У реальних вітроустановках вказані рухи можуть спостерігатися, коли зі зміною напрямку і швидкості повітряного потоку, відбувається, відповідно, поворот гондоли з метою забезпечення перпендикулярності вітрового потоку до площини вітроколеса та поворот лопаті для стабілізації його кутової швидкості та забезпечення оптимальної потужності.

При побудові 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  $m_{хв}$ . 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 відносно її поздовжньої осі на деяку величину  $b_l$ , а поворот лопаті навколо цієї осі обмежується жорсткістю пружини, яка знаходиться в шарнірі кріплення лопаті до маточина вітроколеса. Кінематична схема вітроустановки при складному русі лопатей (обертання навколо трьох осей) зображена на рис. 1, б).

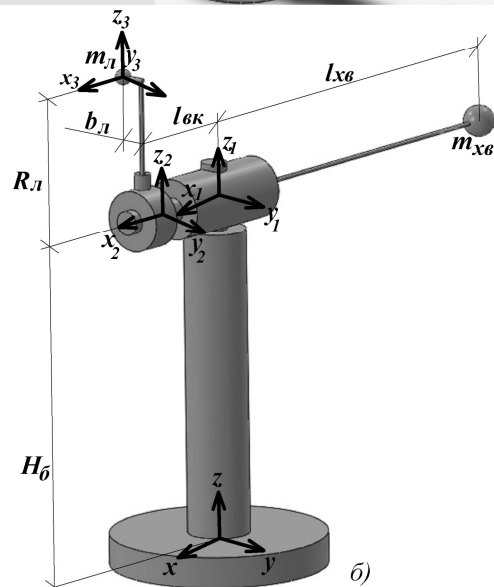
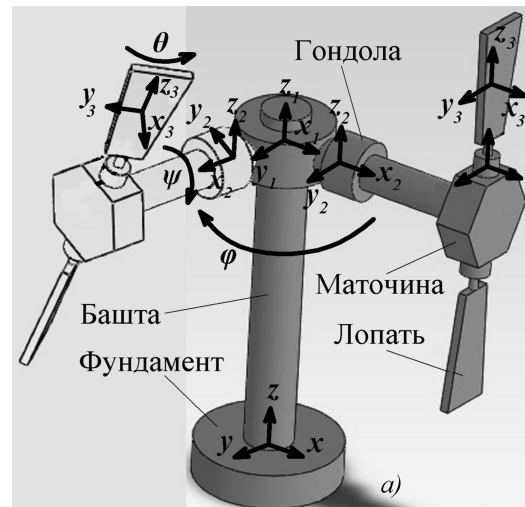


Рис. 1. Принципова (а) і кінематична (б) схеми вітроустановки

Інерційну систему координат  $Oxyz$  розмістимо на фундаменті таким чином, щоб вісь  $Oz$  співпадала з поздовжньою віссю башти, а  $Ox$  і  $Oy$  утворювали горизонтальну площину (рис. 1, б). Система координат  $O_1x_1y_1z_1$  прив'язана до шарніру, який з'єднує башту і гондолу, при чому вісь  $O_1z_1$  дотична до поздовжньої осі башти, а осі  $O_1x_1$  і  $O_1y_1$  утворюють площину обертання гондоли і співнапрямлені з  $Ox$  і  $Oy$ , відповідно. Система координат  $O_2x_2y_2z_2$  прив'язана до шарніру, який з'єднує гондолу і вітроколесо, при чому вісь  $O_2x_2$  співпадає з поздовжньою віссю гондоли, а  $O_2z_2$  співнапрямлена з  $O_1z_1$  і  $Oz$ . Систему координат  $O_3x_3y_3z_3$  розмістимо у місці розміщення зосередженої маси лопаті  $m_l$  таким чином, 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 констатувати, що система має три ступені вільності: обертання навколо осі башти,

гондоли і лопаті. Тому за узагальнені координати приймемо відповідні кути повороту  $\varphi$ ,  $\psi$  і  $\theta$ .

Приймемо, що у початковому положенні вісь гондоли  $O_2x_2$  співпадає з віссю  $O_1x_1$ , осі  $Oz$ ,  $O_1z_1$ ,  $O_2z_2$ ,  $O_3z_3$  – співнапрямлені, тобто лопать розміщується вертикально, а її центр мас лопаті знаходиться у площині обертання вітроколеса, тобто площини  $O_3y_3z_3$ ,  $O_2y_2z_2$  – паралельні (рис. 1). Внаслідок руху системи гондола повернулася на деякий кут  $\varphi$  навколо осі башти відносно  $O_1x_1$ , вітроколесо – на деякий кут  $\psi$  навколо осі гондоли відносно  $O_2z_2$ , лопать – на кут  $\theta$  навколо власної осі відносно  $O_3x_3$ .

Для опису руху системи застосуємо принципи аналітичної механіки, які базуються на побудові диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду. З рис. 1 видно, що положення системи (вітроколеса з однією лопаттю) однозначно визначається кутами  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ , які описують її обертання навколо трьох осей. Тому для даної системи кількість рівнянь Лагранжа другого роду буде рівна трьом і вони матимуть вигляд:

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

де  $E_K$ ,  $E_D$ ,  $E_{II}$  – кінетична, дисипативна і потенціальна енергія системи, відповідно;  $Q_\varphi$ ,  $Q_\psi$ ,  $Q_\theta$  – узагальнені сили, що відповідають обраним узагальненим координатам  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ , відповідно.

У роботі [3] система диференціальних рівнянь (1), яка описує динаміку складного руху лопатей горизонтально-осьової вітроустановки, подана у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & \left[ m_{x_0} \cdot r_{x_0}^2 + m_{0k} \cdot r_{0k}^2 + m_2 \cdot (d_2^2 + l_2^2/12) \right] \cdot \ddot{\varphi} = \\ & = \frac{\rho_n \cdot S \cdot (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2}{2}; \\ & \left( m_x \cdot R_x^2 + 0.5 \cdot m_m \cdot (r_m^2 + (r_m - c_m)^2) \right) \cdot \ddot{\psi} = \\ & = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \rho_n \cdot (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2}{2} \times \\ & \times \left[ \alpha \cdot \frac{\dot{\psi} \cdot R}{V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t)} - \gamma - \right. \\ & \left. - \beta \cdot \left( \frac{\dot{\psi} \cdot R}{V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t)} \right)^2 \right] - M \cdot (\dot{\psi})^m; \\ & m_x \cdot b_x^2 \cdot \ddot{\theta} + C_\theta \cdot \dot{\theta} = 0.5 \cdot n \cdot b_x \cdot \rho_n \cdot l_p \cdot d_p \times \\ & \times \left( (\dot{\psi})^2 \cdot (R_x^2 + (b_x \cdot \cos \theta)^2) + \right. \\ & \left. + (V_H + s \cdot V_H \cdot \cos(k \cdot \pi \cdot t))^2 \right) + \\ & + 2 \cdot m_x \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\psi} \cdot \sqrt{R_x^2 + (b_x \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi \cdot b_x \cdot \cos \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $r_{x_0}$ ,  $r_{0k}$  – відстані від осі башти до точок прикладення зосереджених мас хвостового стабілізатора  $m_{x_0}$  і вітроколеса  $m_{0k}$ , відповідно;  $m_2$ ,  $d_2$ ,  $l_2$  – маса, діаметр і довжина гондоли, відповідно;  $R_x$  – приведена відстань від осі гондоли до центру мас лопаті;  $\rho_m$  – густина матеріалу маточини;  $m_m$ ,  $c_m$ ,  $r_m$  – маса, товщина і зовнішній радіус маточини, відповідно;  $b_x$  – приведена відстань від поздовжньої осі лопаті до її центру мас;  $C_\theta$  – коефіцієнт жорсткості спіральної пружини при закручуванні;  $\rho_n$  – густина повітря;  $S$  – площа хвостового стабілізатора;  $R$  – зовнішній радіус вітроколеса;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – сталі коефіцієнти, величини яких можна визначити з експериментальних кривих аеродинамічного моменту вітроколеса, використовуючи, наприклад, метод найменших квадратів;  $V_H$  – номінальне значення швидкості вітру;  $s$  і  $k$  – коефіцієнти величини і періодичності пульсації швидкості вітру, відповідно, ( $s = 0.2 \dots 0.6$ ,  $k = 0.5 \dots 1$ );  $M$  і  $m$  – коефіцієнт пропорційності і показник степеня моменту навантаження на валу вітроколеса ( $m = 0 \dots 2$ );  $l_{0k}$  – відстань від осі башти до осі лопаті;  $l_p$ ,  $d_p$  – довжина лопаті і ширина її серединного поперечного перерізу;  $n$  – коефіцієнт, який враховує несиметричність розміщення осі лопаті ( $n \approx 0.5 \dots 0.75$ ).

Рівняння (2) являють собою неоднорідні диференціальні рівняння другого порядку. Для їх чисельного розв'язування 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 (нерівномірне обертання гондоли, вітроколеса і лопаті) з метою забезпечення її номінальної потужності  $3 \text{ кВт}$  при розрахунковому значенні швидкості вітру  $V_H = 9 \text{ м/с}$ .

Таблиця 1

$\theta(0), \psi(0), \varphi(0), \text{рад}$		$\dot{\theta}(0), \dot{\psi}(0), \dot{\varphi}(0), \text{рад/с}$			
0		0			
$m_x, \text{кг}$	$b_x, \text{м}$	$l_p(R, r_{x_0}) \approx 2 \cdot R_x, \text{м}$		$d_p, \text{м}$	
20	0.1	2.5		0.25	
$m_{x_0}, \text{кг}$	$m_{0k}, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$d_2, \text{м}$	$l_2, \text{м}$	$c_m, \text{м}$
30	80	110	0.3	0.8	0.05
$m_m, \text{кг}$	$l_{0k}, \text{м}$	$s$	$k$	$n$	$r_m, \text{м}$
10	1	0.6	1	0.65	0.2

На основі рівнянь (2) і даних таблиці 1 побудуємо на рис. 2 наступні часові залежності: кута відхилення гондоли при повороті за напрямком вітру (а); кутової швидкості вітроколеса для різних значень моменту навантаження:  $M = 0$  (б) і  $M = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при  $m = 0$  (в),  $m = 1$  (г),  $m = 2$  (д); кута відхилення лопаті вітроколеса для різних значень коефіцієнта жорсткості  $C_\theta$  (е):  $C_\theta = 4000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$  (штрихова лінія) і  $C_\theta = 10000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$  (суцільна лінія).

Як бачимо із рис. 2,а, рух гондоли має коливний характер із частотою збуджуючої аеродинамічної сили, яка виникає внаслідок часової мінливості напрямку та швидкості вітру. При цьому, якщо припустити, що ця сила є циклічною, а її дію можна описати періодичною функцією (у даному випадку функцією косинуса), то для вітроустановки номінальною потужністю 3 кВт при розрахунковому значенні швидкості вітрового потоку 9 м/с максимальні відхилення гондоли становитимуть 26°.

Щодо графічних залежностей, зображених на рис. 2, б-д), можна констатувати наступне: 1) тривалість перехідного процесу запуску вітроколеса (від моменту старту до оптимальної кутової швидкості для заданого навантаження) обернено пропорційно залежить від величини цього навантаження; 2) амплітуда коливань кутової швидкості в усталеному режимі роботи практично не залежить від типу навантаження і основним чинком зумовлюється мінливістю швидкості вітрового потоку; 3) для кожного типу навантаження на валу вітроколеса існує певна оптимальна кутова швидкість його обертання, значення якої змінюється обернено пропорційно до величини цього навантаження.

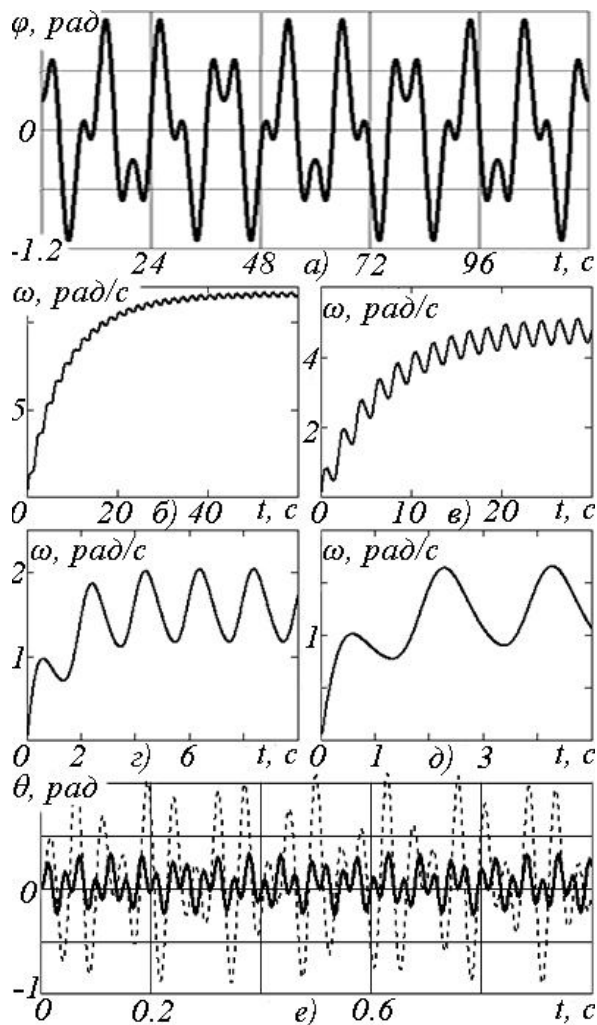


Рис. 2. Часові залежності параметрів складного руху лопатей вітроустановки

Проаналізувавши рис. 2,е, можна зробити наступні висновки: 1) при поривчастому вітрі 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 в основному від величини навантажень на лопать та жорсткості поворотної пружини механізму регулювання (при збільшенні навантаження чи зменшенні жорсткості вона зростає, рис. 2, е); 3) для кожного навантаження на лопать існує певний оптимальний кут її відхилення, який забезпечується механізмом регулювання в залежності від частоти обертання та моменту навантаження на валу вітроколеса. Саме тому актуальним завданням на даний час є моделювання режимів експлуатації, аналіз умов стійкості роботи вітроустановок при поривчастих вітрах, 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, які необхідні для найбільш ефективної роботи більшості машин і механізмів.

### Висновки

У статті розглянуто питання складного руху лопатей при поривчастих вітрах за умови використання в конструкції вітроколеса спеціального механізму регулювання її кута атаки. Побудова диференціальних рівнянь руху проводилася на основі принципів аналітичної механіки з урахуванням мінливості швидкості і напрямку вітрового потоку для різних значень жорсткості поворотної пружини та моменту навантаження на валу вітроколеса. За допомогою програмного комплексу Mathematica вдалося проаналізувати параметри складного руху системи та зробити висновки про актуальність подальших досліджень за обраною проблемою.

На основі проведеного моделювання складного руху лопатей при їх одночасному нерівномірному обертанні навколо трьох осей (башти, гондоли і власних поздовжніх осей) 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. Також на основі рівнянь (2) вдасться дослідити можливість втрати стійкості системи вітроколесо-навантаження при  $M_H = const$ ,  $M_H = M \cdot \omega$  і  $M_H = M \cdot \omega^2$ , які спричиняють режим форсованого гальмування, зумовленого підвищенням моменту опору навантаження понад значення крутного моменту, що розвивається за рахунок аеродинамічних сил.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Харитонов В. П. Условія рационального агрегатирования автономных ветроэлектрических установок: научные труды ВИЭСХ. Т. 86. / М. : ВИЭСХ. — 2000. — 270 с.

2. Кузьо І. В. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. — 2011. — № 3. — С. 85-94.
3. Корендій В. М. Динаміка складного руху лопатей вітроустановки / В. М. Корендій // Науковий вісник НЛТУ України. — 2012. — Вип. 22.08. — С. 68-76.
4. Кузьо І. В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Наукові нотатки. — 2011. — № 33. — С. 115-123.
5. Суббота А. М. Система управління ветроэнергетической установкой / А. М. Суббота, И. Ю. Дыбская, А. В. Заболотный // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. — 2009. — № 3 (37). С. 61—67.
6. Буяльский В. И. Повышение эффективности управления ветротурбиной / В. И. Буяльский // Вісник Севастопольського державного технічного університету. — 2008. — № 88. — С. 152–156.

пост.13.06.12