

Поряд із конструктивними недоліками під час використання систем орієнтації горизонтально-осьових вітроустановок за напрямком вітру слід відзначити виникнення додаткових інерційних навантажень. Зі збільшенням кутової швидкості вітроколеса та різкими когерентними (одночасно змінними за напрямком і швидкістю) потоками повітря на лопаті, поряд із відцентровими та дотичними силами під час обертання ВК і гондоли, діють коріолісові сили інерції. Вказані навантаження мають змінний у часі (а інколи й циклічний) характер, спричиняють виникнення згинальних і крутних моментів та коливних процесів лопатей, що негативно впливають на їхню втомну міцність та підвищують ризик появи резонансних режимів під час роботи вітроустановки [5, 6]. Тому у подальших дослідженнях планується зосередити увагу на вищевказаних навантаженнях та дослідити їх вплив на динамічну поведінку лопатей.

1. <http://www.src-vertical.com/information/beginners/>. 2. Сабинин Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей / Г.Х. Сабинин // Труды ЦАГИ. – 1931. – Вып. 104. – 88 с. 3. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. – М.: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 544 с. 4. Дзензерский В.А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с. 5. Johnson G.L. Wind energy systems. Manhattan: Electronic edition, 2006. – 449 p. 6. Manfred Stielbler. Wind energy systems for electric power generation. – Berlin: Springer, 2008. – 193 p.

УДК 621.548

І.В. Кузьо, В.М. Корендій

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра механіки та автоматизації машинобудування

ДИНАМІКА СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ВІТРОКОЛІС

© Кузьо І.В., Корендій В.М., 2012

На основі спрощеної кінематичної схеми горизонтально-осьової вітроустановки та з використанням рівнянь Лагранжа другого роду побудовано диференціальне рівняння руху гондоли за орієнтації вітроколеса за напрямком вітрового потоку. Визначення параметрів руху та побудова відповідних часових діаграм проводились з урахуванням змінних у часі швидкості та напрямку повітряного потоку.

The differential equation of nacelle motion when orientation of the wind-wheel after the wind-flow direction was built on the basis of the simplified kinematic scheme of horizontal axis wind turbine and with the help of Lagrange second-order equations. The determination of motion parameters and the construction of appropriate time diagrams were realized taking into consideration time dependencies of wind-flow speed and direction.

Постановка проблеми. Сьогодні особливо гостро постала проблема виснаження запасів традиційних енергетичних ресурсів, таких як нафта, природний газ, вугілля тощо. Ситуація, що склалася у світовому енергетичному балансі, погіршується ще й екологічними проблемами, які виникають під час використання атомної та гідроенергетики. Саме тому в усьому світі спостерігається підвищений інтерес до альтернативних та відновлюваних джерел енергії, серед яких особливе місце посідає енергія повітряних потоків. За одну годину на поверхню земної кулі надходить стільки сонячної енергії, скільки людство використовує за цілий рік. При цьому близько двох процентів від цієї енергії перетворюється на енергію повітряних потоків. Враховуючи той факт, що коефіцієнт корисної дії (коефіцієнт відбору потужності) сучасних вітроустановок досягає 45 %, неважко підрахувати, що вітер здатний повністю забезпечити енергетичні потреби людства.

До основних проблем, які перешкоджають масовому розповсюдженню вітроустановок (ВУ), поряд із значною вартістю вітроенергетичного обладнання, належать негативні акустичні та вібраційні чинники їх впливу на довкілля. Осередками коливних процесів у вітроустановках переважно є лопаті. Саме вони сприймають та перетворюють енергію повітряного потоку, якому властива часова мінливість як за інтенсивністю, так і за напрямком. Тому й виникає необхідність досліджувати вплив змінних у часі аеродинамічних навантажень на роботу елементів та систем ВУ, зокрема системи орієнтації вітроколеса.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітроустановки почали масово використовуватися з другої половини ХХ століття. Саме тому протягом останніх кількох десятиліть років 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 [1]: 1) адекватна математична інтерпретація мінливості напрямку і швидкості повітряного потоку та його 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 розглядається в [2, 3], тоді як друге і третє – залишаються сьогодні недостатньо вивченими [4].

Формулювання цілі роботи. Побудувати диференціальне рівняння руху та проаналізувати динамічну поведінку гондоли за орієнтації вітроколеса за напрямком повітряного потоку внаслідок дії змінних у часі аеродинамічних 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, а хвостову частину і вітроколесо – у вигляді зосереджених на протилежних кінцях гондоли мас $m_{хв}$ і $m_{вк}$ відповідно. Також припускаємо, що башта жорстко зацмлена у фундаменті, хвостова частина нерухомо прикріплена до гондоли, а усі інші пари елементів (башта-гондола, гондола-вітроколесо) з'єднані між собою за допомогою нерухомих циліндричних шарнірів. В такий спосіб за орієнтації вітроколеса за напрямком вітру гондола разом із хвостовою частиною і вітроколесом має можливість нерівномірно обертатися навколо осі башти у горизонтальній площині. Кінематичну схему системи орієнтації вітроустановки зображено на рис. 1, б.

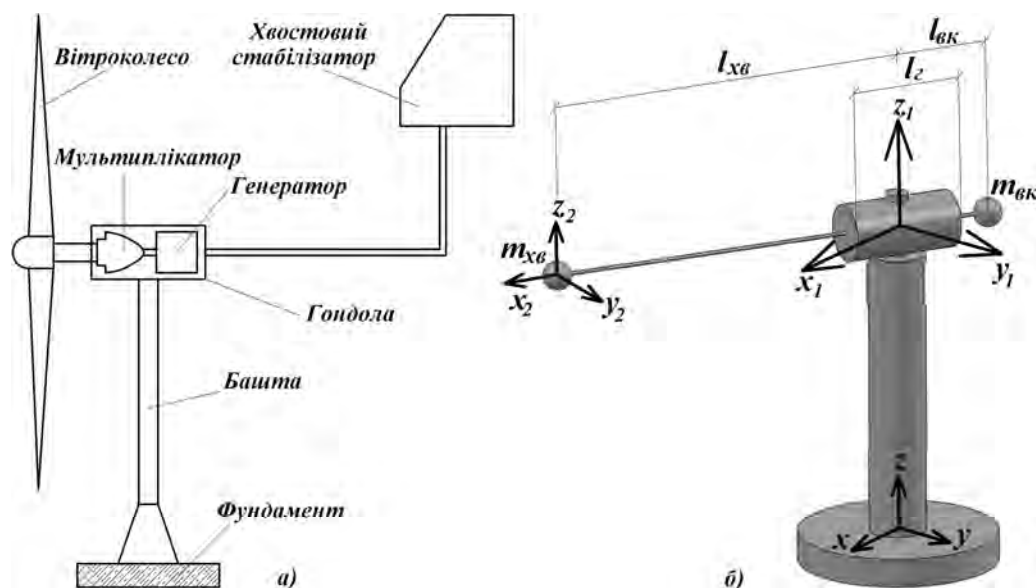


Рис. 1. Принципова (а) та кінематична (б) схеми вітроустановки

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 гондоли 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 гондоли, а O_2z_2 співнапрямлена з O_1z_1 і Oz . Аналізуючи отриману кінематичну схему, можемо зробити висновок, що система має один ступінь вільності – обертання гондоли з вітроколесом і хвостовою частиною навколо осі башти, тому за узагальнену координату виберемо відповідний кут повороту φ . Приймемо, що у початковому положенні системи вісь гондоли O_2x_2 збігається з віссю O_1x_1 , а внаслідок обертання гондоли кут між ними змінився на деяку величину φ . Для описання руху системи використаємо диференціальне рівняння Лагранжа другого роду:

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

де E_K , E_D , E_{Π} – кінетична, дисипативна і потенціальна енергії системи відповідно; Q_{φ} – узагальнена сила, що відповідає обраній узагальненій координаті φ .

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 системи у зв'язку з незначною кутовою швидкістю, можна одразу записати $E_D = E_{\Pi} = 0$. Кінетичну енергію системи визначимо із такої залежності:

$$E_K = 0.5 \cdot I_{Z_1} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = 0.5 \cdot I_{Z_1} \cdot (\dot{\varphi})^2, \quad (2)$$

де I_{Z_1} – момент інерції гондоли із зосередженими масами $m_{x\delta}$ і $m_{\delta k}$ стосовно осі O_1z_1 .

Для визначення членів лівої частини рівняння (1) знайдемо відповідні похідні від виразу (2):

$$\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}} \left(0.5 \cdot I_{Z_1} \cdot (\dot{\varphi})^2 \right) = I_{Z_1} \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\varphi}} \right) = \frac{d}{dt} \left(I_{Z_1} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right) = I_{Z_1} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (3)$$

Момент інерції системи стосовно осі O_1z_1 залежить від величини зосереджених мас $m_{x\delta}$ і $m_{\delta k}$ та розподілу маси гондоли за її довжиною. Припустимо, що маса гондоли розподілена рівномірно, тоді для розрахунку можемо прийняти таку залежність:

$$I_{Z_1} = m_{x\delta} \cdot r_{x\delta}^2 + m_{\delta k} \cdot r_{\delta k}^2 + m_z \cdot \left(d_z^2 + l_z^2 / 12 \right), \quad (4)$$

де $r_{x\delta}$, $r_{\delta k}$ – відстані від осі башти до точок прикладення зосереджених мас $m_{x\delta}$ і $m_{\delta k}$ відповідно; m_z , d_z , l_z – маса, діаметр і довжина гондоли відповідно.

Зовнішні сили, які діють на вітроустановку, можна розділити на аеродинамічні, інерційні та гравітаційні. Останні у цьому випадку не впливають на рух системи. Спершу проаналізуємо дію аеродинамічних навантажень. Вони виникають внаслідок взаємодії елементів вітроустановки (насамперед лопатей і хвостового стабілізатора) із повітряним потоком. Внаслідок симетричності розміщення лопатей у площині обертання вітроколеса аеродинамічні сили, які на них діють, будуть урівноважуватися у місці їх закріплення (на маточині вітроколеса), а тому не чинитимуть впливу на рух гондоли. Враховуючи те, що тиск повітря на хвостовий стабілізатор значно більший, ніж на інші елементи (гондолу, маточину вітроколеса, шарніри тощо), то можна припустити, що аеродинамічні сили будуть зосереджені у точці A системи (рис. 1, б). Типову для території України експериментальну залежність зміни напрямку вітрового потоку за проміжок часу $\Delta t = 10 \text{ хв}$, побудовану з інтервалом 3 с , зображено на рис. 2 [3].

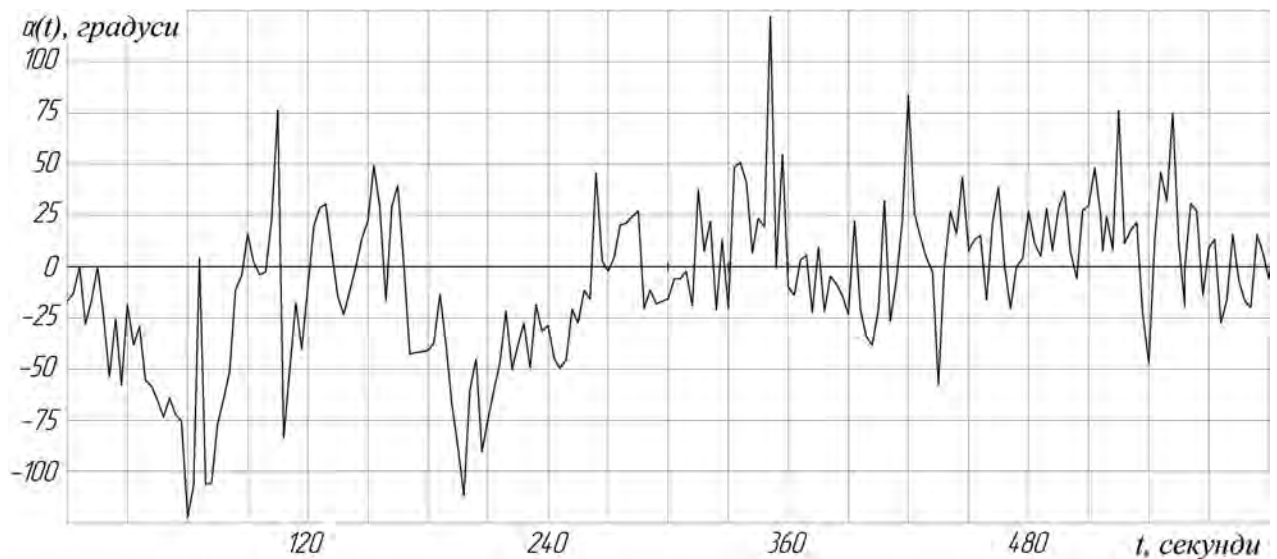


Рис. 2. Залежність зміни напрямку повітряного потоку за проміжок часу $\Delta t = 10$ хв

На рис. 2 не важко помітити, що миттєва (за 3 с) зміна кута напрямку вітру доволі часто досягає $\Delta\alpha = 90^\circ$. Це означає, що у кожен такий момент на гондолу діють максимальні аеродинамічні навантаження, оскільки напрямок вітру є перпендикулярним до площини хвостового стабілізатора. Як відомо, під час дослідження 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. У нашому випадку напрямок повітряного потоку також змінюється в часі. Тому для спрощення розрахунків, можемо припустити, що характер дії аеродинамічних сил є циклічним. У такому разі їх амплітуда дорівнюватиме максимальному впливу вітрового потоку на перпендикулярну до його напрямку площину хвостового стабілізатора, а частота, згідно із покладеною на рис. 2 графічною залежністю, коливатиметься у межах 0.35 c^{-1} . Враховуючи вищеприйняті припущення, вплив аеродинамічних сил на поворот гондולי можемо описати такою періодичною функцією:

$$Q_1 = Q_a \cdot \cos(0.35 \cdot \pi \cdot t), \quad (5)$$

де Q_a – максимальне аеродинамічне навантаження у точці A системи, спричинене тиском перпендикулярного вітрового потоку на площину хвостового стабілізатора. Q_a залежить від інтенсивності (швидкості) повітряного потоку і геометричних параметрів хвостового стабілізатора, які, своєю чергою, обираються відповідно до розмірів і маси гондולי та вітроколеса.

На рис. 3 зображено графічну залежність часової мінливості швидкості вітрового потоку у гірських та приморських районах із середньодобовою швидкістю 9 м/с . Можемо зробити висновок, що максимальні значення $Q_{a \max}$ існуватимуть за швидкості 11 м/с , а мінімальні $Q_{a \min}$ – за 7 м/с . Враховуючи змінний характер інтенсивності, залежність $Q_a(t)$ можна наближено описати періодичною функцією:

$$\begin{aligned} Q_a(t) &= Q_{a \max} - (Q_{a \max} - Q_{a \min}) \cdot \cos(0.5 \cdot \pi \cdot t) = \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot (11^2 - (11^2 - 7^2) \cdot \cos(0.5 \cdot \pi \cdot t)) = \\ &= \rho \cdot S \cdot (60.5 - 36 \cdot \cos(0.5 \cdot \pi \cdot t)), \end{aligned} \quad (6)$$

де ρ – густина повітря; S – площа хвостового стабілізатора (залежить від розмірів ВУ).

Інерційні навантаження, які діють на вітроустановку, можна розділити на дотичні і відцентрові. Для спрощення розрахунків можна припустити, що вітроколесо і лопаті обертаються навколо власних осей симетрії, тоді інерційні навантаження будуть урівноважуватися на відповідних осях і не чинитимуть впливу на рух гондоли. Відцентрова і дотична сили інерції, які виникають під час повороту гондоли, не належать до активних сил, тому для визначення Q_φ не враховуються. За одночасного обертання гондоли і вітроколеса, гондоли і лопаті, вітроколеса і лопаті на систему діятимуть додаткові коріолісові сили інерції F_{cor1} , F_{cor2} , F_{cor3} відповідно. Вони були детально проаналізовані в [1, 4] та інших роботах авторів. Враховуючи вищеприйнятні припущення, коріолісові сили інерції також не чинитимуть впливу на рух гондоли.

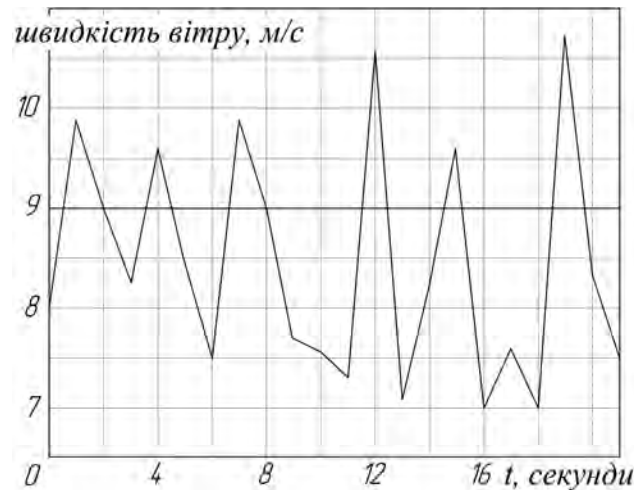


Рис. 3. Часова мінливість швидкості вітру

Отже, узагальнена сила Q_φ дорівнюватиме моменту від аеродинамічного навантаження Q_1 . Тому, використовуючи вирази (3)–(6), рівняння (1) можемо переписати так:

$$\left[m_{xв} \cdot r_{xв}^2 + m_{вк} \cdot r_{вк}^2 + m_2 \cdot \left(d_2^2 + l_2^2 / 12 \right) \right] \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \rho \cdot S \cdot r_{xв} \cdot (60.5 - 36 \cdot \cos(0.5 \cdot \pi \cdot t)) \cdot \cos(0.35 \cdot \pi \cdot t). \quad (7)$$

Рівняння (7) являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами. Для його розв'язування використаємо програмний комплекс МАТЕМАТИСА. У кінцевому варіанті отримуємо часову залежність руху гондоли за орієнтації вітроколеса за змінним напрямком повітряного потоку:

$$\varphi(t) = C_1 + C_2 \cdot t - 0.001431 \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot r_{xв}}{m_{xв} \cdot r_{xв}^2 + m_{вк} \cdot r_{вк}^2 + m_2 \cdot \left(d_2^2 + l_2^2 / 12 \right)} \times \\ \times (56644 \cdot \cos(0.471 \cdot t) - 34949 \cdot \cos(1.1 \cdot t) + 1764 \cdot \cos(2.67 \cdot t)), \quad (8)$$

де C_1 і C_2 – змінні інтегрування, які визначаються із початкових умов.

У таблиці задано початкові умови та вибрано основні геометричні й силові параметри вітроустановки з метою забезпечення її номінальної потужності 3 кВт за розрахункового значення швидкості вітрового потоку 9 м/с . За прототип вітроустановки взято ВЕГ 3/20, яку розроблено на ДП КБ «Южное» (м. Дніпропетровськ) [5].

$\varphi(0), \text{ рад}$	$\dot{\varphi}(0), \text{ рад/с}$	$S, \text{ м}^2$	$m_{xв}, \text{ кг}$	$r_{xв}, \text{ м}$	$m_{вк}, \text{ кг}$	$r_{вк}, \text{ м}$	$m_2, \text{ кг}$	$d_2, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$
0	0	0.8	30	2.5	80	1	110	0,3	0.8

На основі рівняння (8), даних таблиці та часових діаграм зміни напрямку і швидкості вітрового потоку побудуємо графічну залежність $\varphi(t)$ на рис. 3.

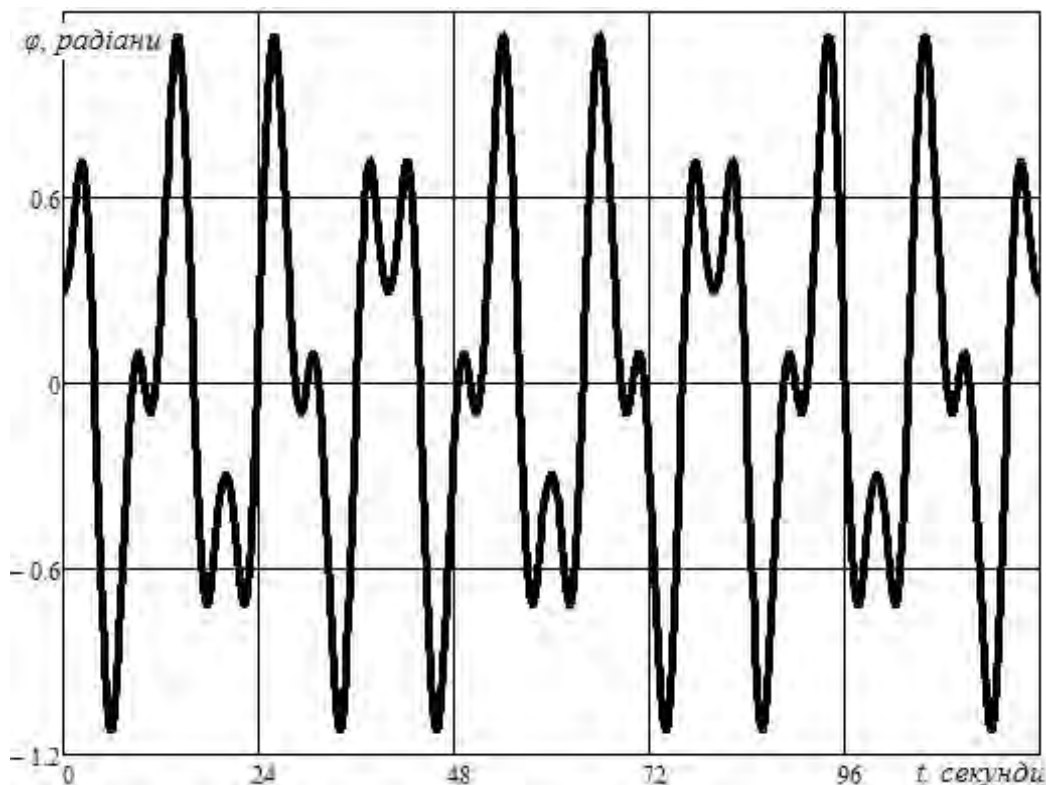


Рис. 4. Часова залежність руху гондоли за періодичної зміни напрямку і швидкості повітряного потоку

Висновки. Розглядаючи башту, гондолу та інші елементи вітроустановки як абсолютно жорсткі тіла, а в'язі, що їх з'єднують, як ідеальні, побудовано спрощену кінематичну схему системи орієнтації вітроколеса. Проаналізувавши основні види навантажень на вітроустановку, зроблено висновок, що на рух гондоли впливають лише аеродинамічні сили, які залежать від розмірів вітроустановки і умовно зосереджені у місці закріплення хвостового стабілізатора. На основі побудованого диференціального рівняння руху гондоли за орієнтації вітроколеса за напрямком вітрового потоку та графічних залежностей (рис. 2 і 3) можемо констатувати, що рух гондоли має коливний характер із частотою збудуючої 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 цьому випадку функцією косинуса), то для вітроустановки номінальною потужністю 3 кВт за розрахункового значення швидкості вітрового потоку 9 м/с максимальні відхилення гондоли становитимуть 26° (рис. 4).

Отже, дослідивши поведінку гондоли за орієнтації вітроколеса, у подальших дослідженнях зможемо проаналізувати вплив її руху на коливні процеси лопатей вітроустановок.

1. 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. 2. 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. 3. 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. 4. Кузьо І.В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. – 2011. – № 33. – С. 115–123. 5. Дзензерский В.А. *Ветроустановки малой мощности* / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – К.: *Наук. думка*, 2011. – 592 с.