

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНЕРЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОЦЕС ВІДЦЕНТРОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОУСТАНОВКИ

© Корендій В.М., 2012

Проаналізовано вплив інерційних навантажень, які виникають під час нерівномірного обертання лопатей вітроустановки навколо трьох осей: башти (за орієнтації вітроколеса за напрямком вітру), гондоли (у разі взаємодії з потоком повітря) і власних поздовжніх осей (у разі регулювання частоти обертання вітроколеса), на процес керування потужністю за допомогою відцентрового регулятора. Обґрунтовано доцільність їх врахування під час моделювання роботи вітроустановки.

The influence of inertial loadings resulting from blades' irregular rotation round three axes – that of the tower (in orientation of the wind-wheel after the wind bearing), of the nacelle (in interaction with the air stream) and of their own longitudinal axes (in regulation of the wind-wheel rotation frequency) on the process of power control with the help of the centrifugal regulator is analyzed. The expediency of their taking into consideration in modeling of the wind turbine work is substantiated.

Постановка проблеми. Одним із найперспективніших засобів вирішення проблем енергоощадження промисловості з погляду економії традиційних енергоресурсів (нафти, природного газу, вугілля тощо) та екологічного захисту довкілля є застосування альтернативних джерел енергії, зокрема вітроенергетичних установок. У майбутньому активне впровадження комбінованих вітроенергетичних установок як приводу різноманітного технологічного обладнання дасть змогу знизити споживання традиційних енергоресурсів у промисловості на 30–50 %.

У разі середньорічних швидкостей вітру до 5 м/с виробництво електроенергії за допомогою вітроустановок вважається недоцільним, тоді як застосування тихохідних горизонтально-осьових багатолопатевоїх вітроколес із системами регулювання потужності й стабілізації кутової швидкості для безпосереднього механічного приводу різноманітного промислового й сільськогосподарського обладнання уже у разі швидкості вітру в 3–4 м/с буде доволі ефективним. Характерними прикладами комбінованих вітроенергетичних систем можуть бути вітрокомпресорні, вітровібраційні, вітронвеєрні установки тощо. На жаль, на сьогодні як український, так і світовий ринок вітротехніки недостатньо наповнений такими установками, що обумовлюється низьким інтересом фірм-виробників до створення дешевих конструкцій і незадовільним рівнем наукового обґрунтування ефективності їх функціонування та розвитку методик розрахунку й оптимізації їх конструктивних та експлуатаційних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні для побудови математичної моделі роботи аеромеханічної частини вітроустановки, тобто системи відбору енергії повітряних мас та передачі її споживачам як механічної енергії обертального руху валу вітроколеса, використовують два ступені вільності, які враховують обертальні рухи вітроколеса та механізму регулювання потужності [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} J_{x_2} \frac{d\omega}{dt} &= M_P \{ \bar{M}_P [Z(\omega, V); \theta] V \} - M_H(t); \\ J_{z_2} \frac{d^2\theta}{dt^2} + K \frac{d\theta}{dt} &= M_A + M_{B_2}(\omega, \theta) + M_{Pp}(\theta) \pm M_{Tp_2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $J_{x_2} = \sum J_{x_{2i}}$, $J_{z_2} = \sum J_{z_{2i}}$ – суми моментів інерції всіх тіл, приведених до осей обертання, відповідно, ВК і лопатей; K – коефіцієнт аеродинамічного моменту демпфування під час обертання лопаті; M_{B_2} – момент інерційних навантажень під час обертання лопаті з відцентровим регулятором навколо осі вітроколеса; M_{Tp_2} – момент тертя у механізмі регулювання; M_p – рушійний момент вітроколеса; M_H – момент навантаження на валу ВК; M_A – момент аеродинамічних сил відносно осі лопаті; M_{Pr} – момент регулювальної пружини; θ – кут відхилення хорди лопаті від площини обертання вітроколеса; ω – кутова швидкість обертання вітроколеса.

До недоліків наявних сьогодні розрахункових схем аеромеханічної системи ВУ з відцентровим регулятором потужності потрібно зарахувати таке: як узагальнену координату, яка відповідає за обертальний рух вітроколеса, доцільніше використовувати кут положення лопаті у площині обертання ВК, а не кутову швидкість його обертання. Це пояснюється тим, що для адекватного математичного опису узагальнених сил (а саме гравітаційних навантажень на лопаті) та кінетичної енергії системи, відповідні похідні якої у рівняннях Лагранжа II роду описують внутрішні інерційні навантаження (відцентрові, дотичні, коріолісові тощо), під час неусталеного руху ВК необхідно відстежувати положення поздовжньої осі лопаті у площині обертання ВК в будь-який момент часу [3]; окрім систем регулювання потужності та стабілізації кутової швидкості ВК у всіх сучасних горизонтально-осьових ВУ застосовуються системи орієнтації за напрямком вітру за допомогою повороту гондоли навколо осі башти. Поворот гондоли зазвичай відбувається із кутовою швидкістю, співмірною із швидкістю обертання тихохідного ВК, а інерційні навантаження, які у цьому разі виникають, істотно впливають на процес регулювання потужності [4]. Отже, окрім двох загально прийнятих ступенів вільності, необхідно ввести ще один – обертальний рух гондоли. Це дасть змогу детальніше дослідити можливості підбору інерційних, жорсткісних і демпфуючих параметрів регуляторів потужності з метою зниження тривалості перехідних процесів, покращення стабільності частоти обертання ВК та обмеження динамічних навантажень на лопаті.

Формулювання цілі статті. Вивести аналітичні залежності та оцінити вплив інерційних навантажень на процес відцентрового регулювання потужності вітроколеса. Обґрунтувати доцільність їх врахування під час моделювання роботи вітроустановки.

Виклад основного матеріалу. Проаналізуємо вплив інерційних навантажень, які виникають під час нерівномірного обертання лопатей вітроустановки навколо трьох осей: башти (у разі орієнтації вітроколеса за напрямком вітру), гондоли (у разі взаємодії з потоком повітря) і власних поздовжніх осей (у разі регулювання частоти обертання вітроколеса), на процес керування потужністю за допомогою відцентрового регулятора.

1. Відцентрові та дотичні сили інерції у разі нерівномірного обертального руху вітроколеса.

За нерівномірного обертального руху ВК, який має місце в режимах запуску, екстреного гальмування, когерентних поривах вітру, на лопаті, окрім відцентрових сил інерції $F_{ВЦД}$, які виникають у разі рівномірного обертання, діють дотичні інерційні навантаження $F_{ДОТ}$ (рис. 1).

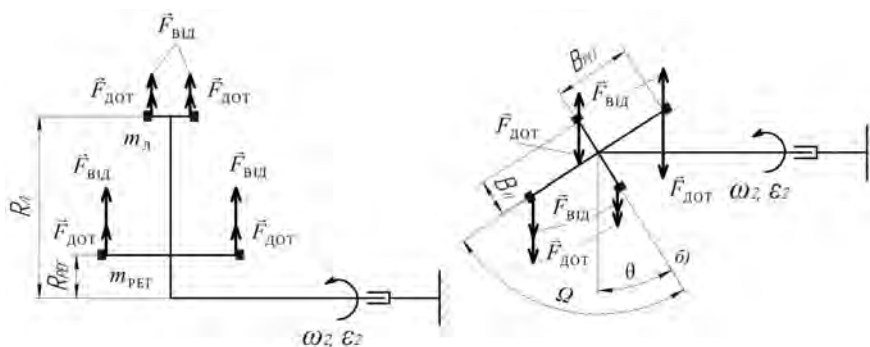


Рис. 1. Схема дії інерційних навантажень на лопать під час обертання ВК

Інерційні навантаження на лопать, які виникають під час обертання ВК залежать від параметрів його руху (кутової швидкості ω_2 та кутового пришвидшення ε_2), геометричних розмірів відцентрового регулятора і лопаті та кута θ положення хорди лопаті відносно площини обертання ВК. Згідно з принципами теоретичної механіки, аналітичні залежності для визначення впливу відцентрових та дотичних навантажень на маси відцентрових тягарців і двох частин лопаті під час обертання ВК, матимуть вигляд:

$$F_{\text{ВІД1}} = m_{\text{Л}} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}; \quad F_{\text{ВІД2}} = m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2};$$

$$F_{\text{ДОТ1}} = m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}; \quad F_{\text{ДОТ2}} = m_{\text{РЕГ}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2},$$

де $m_{\text{РЕГ}}$, $m_{\text{Л}}$ – маси відцентрового тягарця і частини лопаті по одну сторону від її осі, відповідно; $B_{\text{Л}}$, $B_{\text{РЕГ}}$ – приведені відстані від осі лопаті до точок зосередження мас $m_{\text{Л}}$ і $m_{\text{РЕГ}}$, відповідно; Ω – кут між лінією розміщення відцентрових тягарців і хордою лопаті; $R_{\text{Л}}$, $R_{\text{РЕГ}}$ – приведені відстані від осі обертання вітроколеса до центрів мас лопаті і відцентрового регулятора, відповідно.

Як бачимо із рис. 1 дотичні навантаження на відцентрові тягарці і частини лопаті напрямлені в одну сторону – протилежну до напрямку кутового пришвидшення. Отже, еквівалентне дотичне інерційне навантаження буде зрівноважене відносно осі лопаті, тобто не чинитиме впливу на процес регулювання (поворот лопаті навколо власної поздовжньої осі), а спричинятиме згин і розтяг лопаті. Наведемо аналітичні залежності для визначення згинального моменту і сили розтягу:

$$M_{\text{ЗГ1}} = 2 \cdot \left(m_{\text{РЕГ}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{РЕГ}}}{B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta)} \right) \right) \times \right. \\ \left. \times B_{\text{РЕГ}} - m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{Л}}}{B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta} \right) \right) \cdot B_{\text{Л}} \right) =$$

$$= 2 \cdot (m_{\text{РЕГ}} \cdot \varepsilon_2 \cdot R_{\text{РЕГ}} \cdot B_{\text{РЕГ}} - m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_2 \cdot R_{\text{Л}} \cdot B_{\text{Л}});$$

$$F_{\text{РОЗТ1}} = 2 \cdot \left(m_{\text{РЕГ}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2} \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{РЕГ}}}{B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta)} \right) \right) - \right. \\ \left. - m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{Л}}}{B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta} \right) \right) \right) =$$

$$= 2 \cdot (m_{\text{РЕГ}} \cdot \varepsilon_2 \cdot B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta) - m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_2 \cdot B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta).$$

Відцентрові навантаження на різні регульовальні тягарці та частини лопаті по два боки від її осі, напрямлені у протилежні сторони (рис. 1), спричиняють її закручування та розтяг, тобто створюють обертовий момент відносно осі лопаті і зусилля розтягу:

$$M_{\text{ОБ1}} = 2 \cdot \left(m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2} \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{РЕГ}}}{B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta)} \right) \right) \times \right. \\ \left. \times B_{\text{РЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta) - m_{\text{Л}} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{Л}}}{B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta} \right) \right) \cdot B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta \right) =$$

$$= m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_2^2 \cdot B_{\text{РЕГ}}^2 \cdot \sin(2 \cdot (\Omega - \theta)) - m_{\text{Л}} \cdot \omega_2^2 \cdot B_{\text{Л}}^2 \cdot \sin(2 \cdot \theta);$$

$$F_{\text{РОЗТ2}} = 2 \cdot \left(m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{РЕГ}}}{B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta)} \right) \right) - \right. \\ \left. - m_{\text{Л}} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{R_{\text{Л}}}{B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta} \right) \right) \right) =$$

$$= 2 \cdot (m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_2^2 \cdot R_{\text{РЕГ}} - m_{\text{Л}} \cdot \omega_2^2 \cdot R_{\text{Л}}).$$

Для наближеного оцінювання залежності обертового моменту $M_{\text{ОБ1}}$ від кутової швидкості ВК для різних значень кута відхилення хорди лопаті задамо такі геометричні параметри лопаті й регулятора: $m_{\text{РЕГ}} = 0,5 \text{ кг}$, $m_{\text{Л}} = 0,75 \text{ кг}$, $B_{\text{РЕГ}} = 0,15 \text{ м}$, $B_{\text{Л}} = 0,05 \text{ м}$, $\Omega = \pi/2$.

Отже, як бачимо із рис. 2, у разі зростання частоти обертання ВК обертовий момент, що намагається повернути лопать у флюгерне положення, зростає. У цьому разі, зі зменшенням кута відхилення лопаті його вплив різко зменшується. Завдяки виникненню обертового моменту $M_{\text{ОБ1}}$ забезпечується регулювання частоти обертання вітроколеса за рахунок зміни кутового положення хорди лопаті стосовно набігаючого потоку повітря.

2. Відцентрові та дотичні сили інерції під час нерівномірного обертального руху гондоли.

У разі нерівномірного обертального руху гондоли, спричиненому орієнтацією ВК за напрямком вітру на лопаті і механізм регулювання, діють змінні за абсолютною величиною і напрямком відцентрові і дотичні навантаження (рис. 3), модуль яких залежить від кута θ , кутового положення осі лопаті у площині обертання ВК, параметрів руху гондоли (кутової швидкості ω_1 та кутового пришвидження ε_1).

Аналітичні вирази для визначення впливу відцентрових і дотичних навантажень на маси двох частин лопаті і регулювальних тягарців мають вигляд:

$$F_{\text{ВІД3}} = m_{\text{Л}} \cdot \omega_1^2 \cdot \sqrt{(L_{\text{БК}} \pm B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta)^2 + ((R_{\text{Л}} \cdot \cos \psi)^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2)};$$

$$F_{\text{ВІД4}} = m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_1^2 \cdot \sqrt{(L_{\text{БК}} \pm B_{\text{РЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta))^2 + ((R_{\text{РЕГ}} \cdot \cos \psi)^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2)};$$

$$F_{\text{ДОТ3}} = m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{(L_{\text{БК}} \pm B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta)^2 + ((R_{\text{Л}} \cdot \cos \psi)^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2)};$$

$$F_{\text{ДОТ4}} = m_{\text{РЕГ}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{(L_{\text{БК}} \pm B_{\text{РЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta))^2 + ((R_{\text{РЕГ}} \cdot \cos \psi)^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2)}.$$

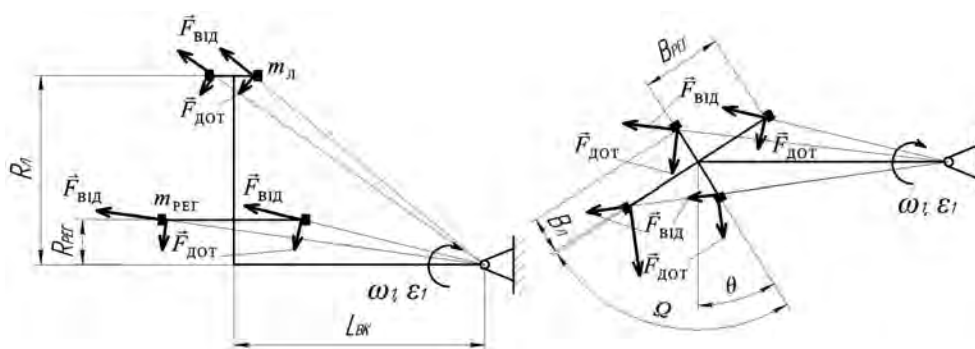


Рис. 3. Схема дії інерційних навантажень на лопать під час обертання гондоли

Як бачимо із рис. 3 всі інерційні навантаження на частини лопаті і регулювальні тягарці напрямлені в різні сторони, що спричинятиме виникнення згинальних моментів та сил розтягу, а також обертового моменту відносно осі лопаті, який впливатиме на роботу відцентрового регулятора, намагаючись повернути лопать у флюгерне положення. Значення останнього можемо знайти із такої залежності:

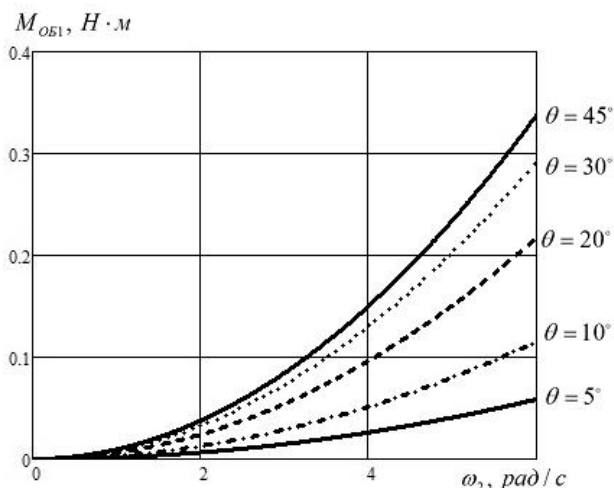


Рис. 2. Залежність $M_{\text{ОБ1}}$ від кутової швидкості ВК для різних значень кута відхилення хорди лопаті

$$\begin{aligned}
M_{\text{ОБ2}} = & m_{\text{ПЕГ}} \cdot \omega_1^2 \cdot (L_{\text{БК}} + B_{\text{ПЕГ}} \sin(\Omega - \theta)) \cdot B_{\text{ПЕГ}} \times \\
& \times \cos \left((\Omega - \theta) + \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} + B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)}{\sqrt{(L_{\text{БК}} + B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta))^2 + (B_{\text{ПЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right) + \\
& + m_{\text{Л}} \cdot \omega_1^2 \cdot (L_{\text{БК}} - B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta) \cdot B_{\text{Л}} \cdot \cos \left(\theta - \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} - B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta}{\sqrt{(L_{\text{БК}} - B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta)^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right) - \\
& - m_{\text{ПЕГ}} \cdot \omega_1^2 \cdot (L_{\text{БК}} - B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)) \cdot B_{\text{ПЕГ}} \times \\
& \times \cos \left((\Omega - \theta) - \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} - B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)}{\sqrt{(L_{\text{БК}} - B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta))^2 + (B_{\text{ПЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right) - \\
& - m_{\text{Л}} \cdot \omega_1^2 \cdot (L_{\text{БК}} + B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta) \cdot B_{\text{Л}} \cdot \cos \left(\theta + \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} + B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta}{\sqrt{(L_{\text{БК}} + B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta)^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right) - \\
& - m_{\text{ПЕГ}} \cdot \varepsilon_1 \cdot (L_{\text{БК}} + B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)) \cdot B_{\text{ПЕГ}} \times \\
& \times \sin \left((\Omega - \theta) + \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} + B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)}{\sqrt{(L_{\text{БК}} + B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta))^2 + (B_{\text{ПЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right) + \\
& + m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_1 \cdot (L_{\text{БК}} - B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta) \cdot B_{\text{Л}} \cdot \sin \left(\theta - \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} - B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta}{\sqrt{(L_{\text{БК}} - B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta)^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right) + \\
& + m_{\text{ПЕГ}} \cdot \varepsilon_1 \cdot (L_{\text{БК}} - B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)) \cdot B_{\text{ПЕГ}} \times \\
& \times \sin \left((\Omega - \theta) - \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} - B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta)}{\sqrt{(L_{\text{БК}} - B_{\text{ПЕГ}} \cdot \sin(\Omega - \theta))^2 + (B_{\text{ПЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right) - \\
& - m_{\text{Л}} \cdot \varepsilon_1 \cdot (L_{\text{БК}} + B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta) \cdot B_{\text{Л}} \cdot \cos \left(\theta + \arccos \left(\frac{L_{\text{БК}} + B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta}{\sqrt{(L_{\text{БК}} + B_{\text{Л}} \cdot \sin \theta)^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right).
\end{aligned}$$

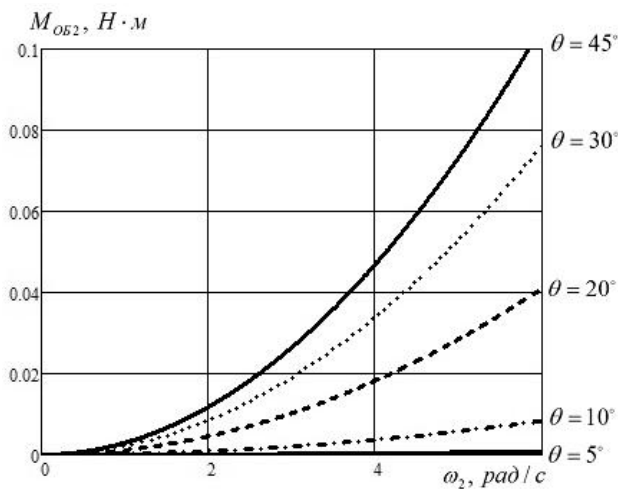


Рис. 4. Залежність $M_{\text{ОБ2}}(\omega_1)$ для різних значень кута відхилення хорди лопаті

Для наближеного оцінювання величини обертового моменту $M_{\text{ОБ2}}$ та встановлення його впливу на механізм регулювання побудуємо залежність $M_{\text{ОБ2}}(\omega_1)$ для різних значень кута відхилення лопаті (рис. 4), припускаючи для спрощення розрахунків, що рух гондоли рівномірний ($\varepsilon_1 \approx 0$). Відстань від осі лопаті до осі башти приймаємо $L_{\text{БК}} = 0,2 \text{ м}$.

Як бачимо із рис. 4, обертовий момент $M_{\text{ОБ2}}$ зростає зі збільшенням кутової швидкості гондоли і різко зменшується у разі зменшення кута відхилення лопаті. За абсолютною величиною $M_{\text{ОБ2}}$ може сягати 30 % від обертового моменту $M_{\text{ОБ1}}$, який створює

ється відцентровими силами під час обертання ВК. Звідси можна зробити висновок про доцільність врахування $M_{ОБ2}$ у разі дослідження процесу регулювання потужності ВУ.

3. Відцентрові та дотичні сили інерції за нерівномірного обертального руху лопаті.

Схема дії інерційних навантажень на регулювальні тягарці та частини лопаті під час її обертання навколо власної поздовжньої осі зображена на рис. 5.

Як видно зі схеми, відцентрові й дотичні навантаження зрівноважуються відносно осі лопаті, не спричиняючи згинальних чи розтягувальних зусиль. Дотичні сили інерції за нерівномірного обертання лопаті призводять до виникнення моменту закручування. Інерційні навантаження і момент закручування можна визначити із таких залежностей:

$$\begin{aligned} F_{ВІД4} &= m_{Л} \cdot \omega_3^2 \cdot B_{Л}; & F_{ВІД5} &= m_{РЕГ} \cdot \omega_3^2 \cdot B_{РЕГ}; \\ F_{ДОТ4} &= m_{Л} \cdot \varepsilon_3 \cdot B_{Л}; & F_{ДОТ5} &= m_{РЕГ} \cdot \varepsilon_3 \cdot B_{РЕГ}; \\ M_{кр} &= 2 \cdot \left(m_{Л} \cdot \varepsilon_3 \cdot B_{Л}^2 + m_{РЕГ} \cdot \varepsilon_3 \cdot B_{РЕГ}^2 \right). \end{aligned}$$

4. Коріолісові сили інерції у разі одночасного обертання вітроколеса і гондоли, вітроколеса і лопаті, гондоли і лопаті.

Згідно з означенням, коріолісове пришвидшення – це складова \vec{a}_{cor} абсолютного пришвидшення точки під час її складного руху, що дорівнює подвоєному векторному добутку вектора переносної кутової швидкості $\vec{\omega}_e$ на вектор відносної швидкості \vec{V}_r цієї точки: $\vec{a}_{cor} = 2 \cdot (\vec{\omega}_e \times \vec{V}_r)$. Під час розрахунку коріолісового пришвидшення необхідно пам'ятати, що на практиці воно лежатиме в площині переносного обертання, згідно з правилом Жуковського: щоб знайти напрям коріолісового пришвидшення, необхідно спроектувати вектор відносної швидкості на площину переносного обертання та повернути його проекцію на кут 90° за напрямком переносного обертання. Коріолісова сила ж інерції дорівнює добутку маси тіла на коріолісове пришвидшення і напрямлена протилежно до нього.

У разі одночасного руху гондоли і вітроколеса за переносну приймемо кутову швидкість гондоли, тоді відносною буде колова швидкість відцентрових тягарців і частин лопаті навколо осі ВК. Отже, залежності для визначення впливу коріолісових навантажень на відцентрові тягарці й частини лопаті матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} F_{cor1} &= 2 \cdot m_{Л} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{R_{Л}^2 + (B_{Л} \cdot \cos \theta)^2} \cdot \cos \left(\psi \pm \arccos \left(\frac{R_{Л}}{\sqrt{R_{Л}^2 + (B_{Л} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right); \\ F_{cor2} &= 2 \cdot m_{РЕГ} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{R_{РЕГ}^2 + (B_{РЕГ} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2} \cdot \cos \left(\psi \pm \arccos \left(\frac{R_{РЕГ}}{\sqrt{R_{РЕГ}^2 + (B_{РЕГ} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right). \end{aligned}$$

Схема дії коріолісових сил інерції у разі одночасного обертання гондоли і ВК зображена на рис. 6.

Із рис. 6 та формул для визначення F_{cor1} і F_{cor2} видно, що за рахунок різниці кутів між вектором переносної кутової швидкості й напрямком колової швидкості регулювальних тягарців і частин лопаті по обидва боки від її осі, коріолісові сили

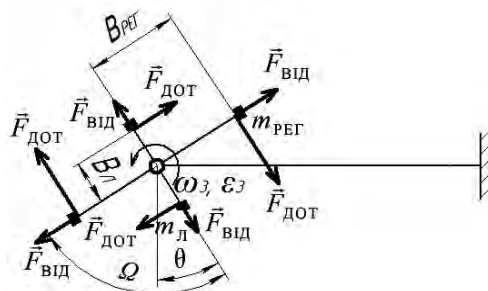


Рис. 5. Схема дії інерційних навантажень на лопать під час її обертання навколо власної поздовжньої осі

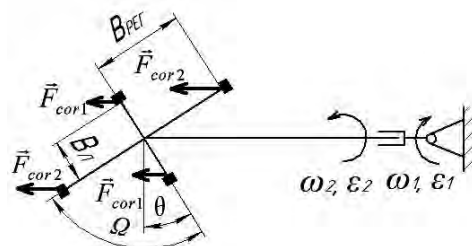


Рис. 6. Схема дії коріолісових сил інерції у разі одночасного обертання гондоли і ВК

інерції створюють обертовий момент, який впливає на процес регулювання потужності, намагаючись повернути лопать. Визначити останній можна із залежності

$$M_{\text{ОБЗ}} = 2 \cdot m_{\text{Л}} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2} \cdot B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta \times \\ \times \left[\cos \left(\psi + \arccos \left(\frac{R_{\text{Л}}}{\sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right) - \cos \left(\psi - \arccos \left(\frac{R_{\text{Л}}}{\sqrt{R_{\text{Л}}^2 + (B_{\text{Л}} \cdot \cos \theta)^2}} \right) \right) \right] + \\ + 2 \cdot m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2} \cdot B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta) \times \\ \times \left[\cos \left(\psi - \arccos \left(\frac{R_{\text{РЕГ}}}{\sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right) - \cos \left(\psi + \arccos \left(\frac{R_{\text{РЕГ}}}{\sqrt{R_{\text{РЕГ}}^2 + (B_{\text{РЕГ}} \cdot \cos(\Omega - \theta))^2}} \right) \right) \right].$$

Для наближеного оцінювання величини обертового моменту $M_{\text{ОБЗ}}$ та встановлення його впливу на механізм регулювання побудуємо залежності $M_{\text{ОБЗ}}(\omega_1, \omega_2)$ для характерних значень кута відхилення хорди лопаті ($\theta = 0^\circ$; $\theta = 45^\circ$; $\theta = 90^\circ$) та кута положення лопаті у площині обертання ВК ($\psi = 0^\circ$; $\psi = 45^\circ$; $\psi = 90^\circ$) (рис. 7).

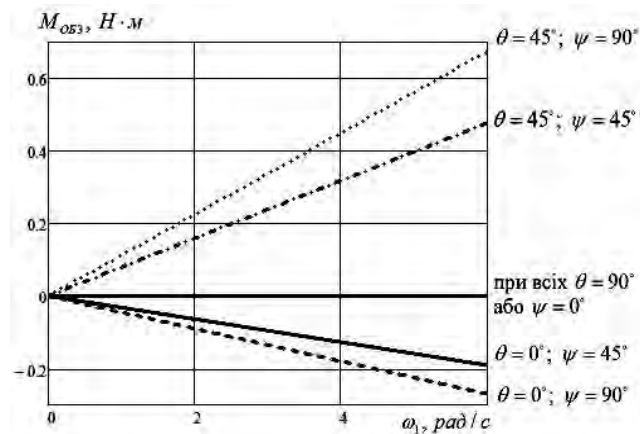


Рис. 7. Залежність $M_{\text{ОБЗ}}(\omega_1)$ для різних значень кута відхилення хорди лопаті при $\omega_2 = 6 \text{ рад/с}$

кількість відцентрових тягарців і частин лопаті навколо її осі. Отже, залежності для визначення впливу коріолісових навантажень на відцентрові тягарці й частини лопаті матимуть вигляд:

$$F_{\text{cor3}} = 2 \cdot m_{\text{Л}} \cdot \omega_1 \cdot \omega_3 \cdot B_{\text{Л}} \cdot \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \psi};$$

$$F_{\text{cor4}} = 2 \cdot m_{\text{РЕГ}} \cdot \omega_1 \cdot \omega_3 \cdot B_{\text{РЕГ}} \cdot \sqrt{\cos^2(\Omega - \theta) + \sin^2(\Omega - \theta) \cdot \cos^2 \psi}.$$

Схема дії коріолісових сил інерції у разі одночасного обертання гондоли і лопатей зображена на рис. 8.

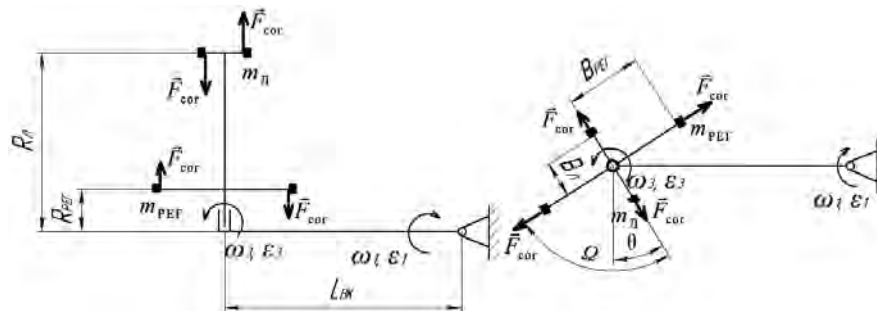


Рис. 8. Схема дії коріолісових сил інерції у разі одночасного обертання гондоли і лопатей

Як бачимо із рис. 8 коріолісові сили інерції, які виникають під час одночасного обертання гондоли і лопаті, зрівноважуються відносно осі лопаті й не впливають на роботу відцентрового регулятора потужності.

У разі одночасного руху ВК і лопаті за переносну приймемо кутову швидкість ВК, тоді відносною буде колова швидкість відцентрових тягарців і частин лопаті навколо її осі. Отже, залежності для визначення впливу коріолісових навантажень на відцентрові тягарці й частини лопаті матимуть вигляд:

$$F_{cor5} = 2 \cdot m_{Л} \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot B_{Л} \cdot \sin \theta; \quad F_{cor6} = 2 \cdot m_{РЕГ} \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot B_{РЕГ} \cdot \sin^2 (\Omega - \theta).$$

Схема дії коріолісових сил інерції у разі одночасного обертання вітроколеса і лопатей зображена на рис. 9.

Як бачимо із рис. 9 коріолісові сили інерції, які виникають за одночасного руху ВК і лопаті, діють у площині обертання ВК і не впливають на роботу відцентрового регулятора потужності.

Висновки. Основні навантаження, які діють на лопаті під час їх нерівномірного складного руху – обертання навколо трьох осей: башти, гондоли і власної поздовжньої осі, поділяються на аеродинамічні, гравітаційні та інерційні. До останніх своєю чергою належать відцентрові й дотичні навантаження за нерівномірного обертального руху гондоли, ВК і лопаті та коріолісові сили інерції у разі одночасного обертання гондоли і ВК, гондоли і лопаті, ВК і лопаті.

У результаті проведеного аналізу інерційних навантажень встановлено, що вплив на обертальний рух лопаті навколо власної осі, тобто на процес регулювання потужності, чинять відцентрові сили під час обертання ВК, відцентрові й дотичні сили під час обертання гондоли та коріолісові сили інерції під час одночасного обертання вітроколеса і гондоли. До того ж, якщо перші навантаження умовно прийняти за 100 %, то максимальний вплив других можна оцінити у 30 %, а останніх – у 120 %. Отже, необхідно констатувати той факт, що загалом під час моделювання роботи аеромеханічної системи вітроустановки з трьома ступенями вільності та зокрема під час дослідження процесу відцентрового регулювання потужності поворотом лопатей навколо власних поздовжніх осей потрібно враховувати окрім відцентрових сил під час обертання ВК, які традиційно використовуються для моделювання обертального руху лопаті, також і відцентрові сили під час обертання гондоли та коріолісові сили у разі одночасного руху гондоли і ВК.

1. Коханевич В.П. Вплив параметрів відцентрового регулятора ротора на статичні та динамічні характеристики вітроустановок малої потужності: дис.... канд. техн. наук: 05.14.08 / Коханевич Володимир Петрович. – К., 2010. – 210 с. 2. Легошин Д.В. Енергетична ефективність автономної вітроелектроустановки зі стабілізацією частоти обертання ротора за умов косоного обдування: дис.... канд. техн. наук: 05.14.08 / Легошин Денис Валерійович. – К., 2012. – 215 с. 3. Корендій В.М. Динаміка обертального руху вітроколеса / В.М. Корендій // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2012. – № 729. – С. 47–53. 4. Корендій В.М. Оцінювання інерційних навантажень вітроколеса / В.М. Корендій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – № 2. – С. 130–136.

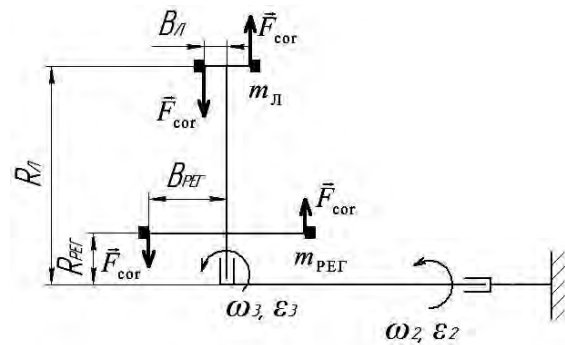


Рис. 9. Схема дії коріолісових сил інерції у разі одночасного обертання ВК і лопаті