

УДК 629.73.015.3

0580-016.65

А.С. Крижановський, канд. техн. наук

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ФЛАТЕРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: kranst@i.com.ua

Розглянуто вплив основних конструктивних параметрів флатерного перетворювача на критичну швидкість флатера і частоту коливань робочого органу. Визначено оптимальні значення параметрів, при яких критична швидкість буде найменшою, а частота коливань найбільшою.

Вступ

Останніми роками практично в усіх країнах світу велика увага приділяється виробництву електричної і теплової енергії на базі нетрадиційних поновлюваних джерел енергії. Це обумовлено постійним подорожчанням і все більш очевидним вичерпанням запасів традиційних енергоресурсів – нафти, газу, вугілля.

У більшості промислово розвинутих країн (США, Німеччині, Японії, Франції, Англії та ін.) існують національні програми розвитку нетрадиційної енергетики.

В Україні використання поновлюваних джерел енергії також підтримується державою. Про це свідчить прийнятий Верховною Радою закон "Про альтернативні джерела енергії", де особлива увага відведена розвитку вітроенергетики.

Для перетворення енергії вітру розроблено багато пристроїв, в яких робочий орган може здійснювати обертальний, поступальний або коливальний рух. До останньої групи належить флатерний перетворювач, принцип дії якого базується на використанні автоколивань типу флатера [1].

Робочим органом флатерного перетворювача є крилова лопать, що встановлена горизонтально на пружних опорах, жорсткості яких є різними і дорівнюють відповідно c_1 і c_2 (рис. 1).

Стабілізація амплітуди коливань лопаті в таких пристроях забезпечується введенням у конструкцію додаткових обмежувальних пружин жорсткості c_d , установлених симетрично осі рівноваги на деякій відстані l_1 .

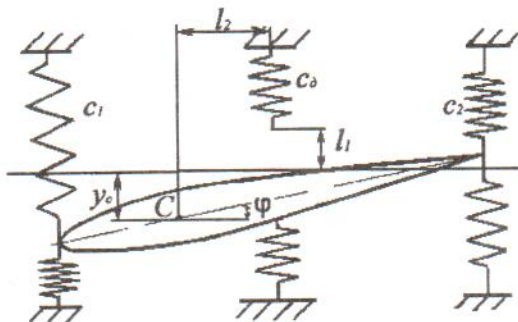


Рис. 1. Розрахункова схема флатерного перетворювача з обмежувальними пружинами

У працях [2; 3] проведено аналіз сил, що діють на крилову лопать у разі обдування повітряним потоком, отримано вирази для аеродинамічних сил і моменту з урахуванням нестационарності повітряного потоку, а також побудовано математичну модель флатерного перетворювача, яка дозволяє досліджувати його роботу при різних швидкостях вітру.

Однак у працях [2; 3] не було визначено вплив конструктивних параметрів перетворювача на критичну швидкість флатера та частоту коливань лопаті.

Мета статті – дослідження впливу конструктивних параметрів на роботу флатерного перетворювача, а також оптимізація значень, при яких критична швидкість флатера буде найменшою, а частота коливання лопаті найбільшою.

Рівняння руху горизонтально розташованої лопаті мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 m_{зв} \ddot{y}_c &= \pi \rho b d V^2 \left[C_1(k) \left(\varphi - \frac{\dot{y}_c}{V} + \frac{1}{V} \left(\frac{3}{4} b - e \right) \dot{\varphi} \right) + \right. \\
 &+ \frac{b}{4V} \left(\dot{\varphi} - \frac{1}{V} \dot{y}_c + \frac{1}{V} \left(\frac{b}{2} - e \right) \dot{\varphi} \right) \left. \right] - \\
 &- (c_1 + c_2) y_c - (c_1 e - c_2 (b - e)) \varphi - \\
 &- k_2 c_d (y_c + l_2 \varphi - l_1 \operatorname{sgn}(y_c + l_2 \varphi)), \\
 J_{зв} \ddot{\varphi} &= \pi \rho b d V^2 \left[C_1(k) \left(\varphi - \frac{\dot{y}_c}{V} + \frac{1}{V} \left(\frac{3}{4} b - e \right) \dot{\varphi} \right) \times \right. \\
 &\times \left(e - \frac{b}{4} \right) - \frac{b}{4V} \left(\frac{b}{2} - e \right) \left(\dot{\varphi} - \frac{\dot{y}_c}{V} + \frac{1}{V} \left(\frac{b}{2} - e \right) \dot{\varphi} \right) \left. \right] - \\
 &- \frac{\pi}{16} \rho b^3 d V \dot{\varphi} - (c_1 e - c_2 (b - e)) y_c - \\
 &- (c_1 e^2 + c_2 (b - e)^2) \varphi + \\
 &+ k_2 c_d l_2 (y_c + l_2 \varphi - l_1 \operatorname{sgn}(y_c + l_2 \varphi)),
 \end{aligned}$$

де $m_{зв}$, $J_{зв}$ – відповідно зведена маса і зведений момент інерції системи; y_c – вертикальне переміщення центра мас крила; ρ – густина повітря; b – довжина хорди крила; d – довжина крила; V –

швидкість вітру; $C_1(k)$ – модифікована функція Теодорсена; φ – кут повороту лопаті; e – відстань від передньої кромки профілю до центра мас лопаті; c_1 і c_2 – відповідно жорсткість передньої і задньої опори; k_2 – функція Кронекера; c_d – жорсткість обмежувальних пружин; l_2 – відстань від центра мас лопаті до обмежувальних пружин; l_1 – відстань від осі рівноваги лопаті до обмежувальних пружин.

Наведені рівняння дозволяють визначити критичну швидкість флатера і частоту коливань лопаті.

Будемо вважати, що система має такі вихідні параметри, при яких

$$V_{кр0} = 11 \text{ м/с і } p_0 = 9,43 \text{ рад/с.}$$

Розглянемо спочатку вплив пружних параметрів, а саме жорсткостей передньої c_1 і задньої c_2 опори на роботу перетворювача.

Для будь-якої системи, схильної до флатера, правдива теорема, сформульована Є.П. Гроссманом [4]: одночасна зміна усіх жорсткостей системи у n_c разів веде до зміни критичної швидкості флатера і частоти коливань крила в $\sqrt{n_c}$ разів:

$$V_{кр} = V_{кр0} \sqrt{n_c}; \quad p = p_0 \sqrt{n_c}, \quad (1)$$

де $V_{кр0}$, p_0 – критична швидкість і частота при вихідних значеннях параметрів системи.

Результати розрахунків підтверджують правдивість теореми Гроссмана для флатерного перетворювача, оскільки значення $V_{кр}$ і p , визначені за формулою (1), точно збігаються з критичною швидкістю і частотою, що обчислені аналітичним методом.

Отже, використовуючи теорему Гроссмана, можна припустити без виконання громіздких операцій значення критичної швидкості і частоти при одночасній зміні жорсткостей c_1 і c_2 , а також визначити величину необхідної зміни жорсткостей, щоб одержати задану величину критичної швидкості та частоти.

Згідно з формулами (1) чим більше жорсткість пружних опор, тим більше критична швидкість флатера і частота коливань крила.

Зміна жорсткості окремих елементів конструкції перетворювача при збереженні жорсткості інших може давати не тільки кількісно, але і якісно інші залежності.

Дійсно, жорсткості c_1 і c_2 окремо неоднаково впливають на основні характеристики перетворювача.

Дослідження показали, що критична швидкість флатера значною мірою залежить від відношення жорсткостей пружних опор c_1/c_2 , на яких установлене крило.

Для працездатності даного перетворювача необхідно, щоб жорсткість передньої опори c_1 була більше жорсткості задньої опори c_2 .

Інакше значення критичної швидкості буде комплексним, що свідчить про неможливість виникнення флатера.

Залежність критичної швидкості флатера від відношення жорсткостей пружних опор c_1/c_2 показана на рис. 2, а.

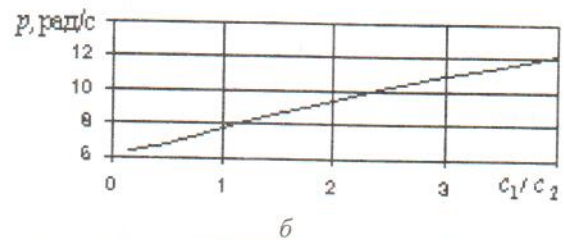
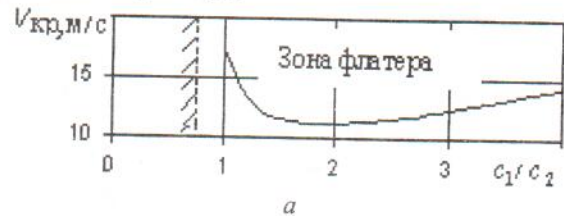


Рис. 2. Вплив відношення жорсткостей c_1/c_2 флатерного перетворювача на критичну швидкість $V_{кр}$ (а) і частоту p (б)

З рис. 2, а видно, що, якщо $c_1/c_2 < 1$, флатер буде відсутній.

При рівності жорсткостей c_1 і c_2 коливання типу флатера можливі, однак критична швидкість при цьому буде досить великою.

Із збільшенням жорсткості передньої опори c_1 швидкість флатера зменшується, і при $c_1 = 2c_2$ вона досягне свого мінімального значення.

У разі подальшого зростання c_1 критична швидкість почне збільшуватися.

Отже, при проектуванні флатерного перетворювача для одержання мінімальної критичної швидкості необхідно, щоб жорсткість передньої опори c_1 була в 2 – 2,5 рази більше жорсткості задньої опори c_2 .

Частота коливань крила зі збільшенням відношення жорсткостей c_1/c_2 буде збільшуватися (рис. 2, б).

При цьому в дофлатерній зоні коливання будуть згасаючими, у той час як у зоні флатера вони мають сталий характер.

Крім пружних характеристик, на критичну швидкість і частоту коливань крила істотно впливають геометричні параметри перетворювачів, такі, як довжина хорди b і подовження крила Λ .

Чим більше довжина хорди b при незмінному подовженні Λ , тим менша швидкість вітру необхідна для збудження флатера (рис. 3, а).

Але якщо довжину хорди збільшити в порівнянні з вихідною більш ніж у 1, 2 рази, то значення критичної швидкості стає уявним, що свідчить про неможливість флатера.

При цьому за вихідні значення беремо $b_0 = 2$ м і $\Lambda_0 = 5$.

Збільшення довжини хорди призводить також до зміни частоти коливань крила p . Так, при $b \leq 0,9b_0$ частота коливань збільшується. Інакше буде спостерігатися незначне зменшення p (рис. 3, б).

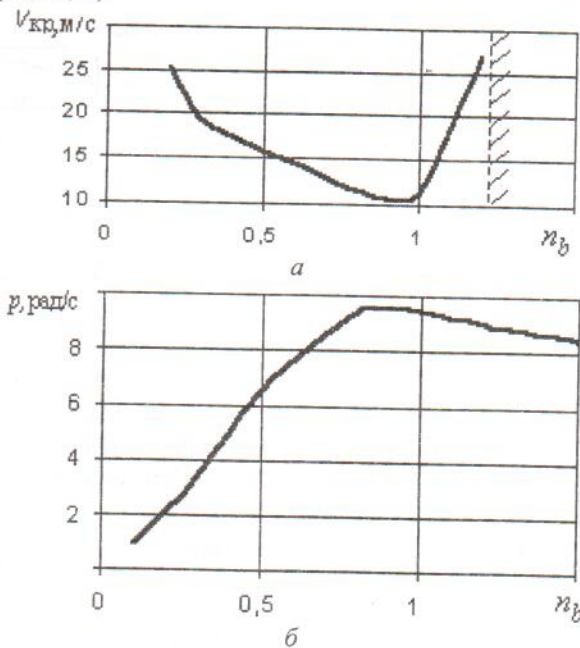


Рис. 3. Вплив довжини хорди крила на критичну швидкість $V_{кр}$ (а) і частоту p (б)

Як видно з рис. 4, чим більше подовження крила Λ , тим менше критична швидкість $V_{кр}$. Частота коливань крила від подовження Λ не залежить.

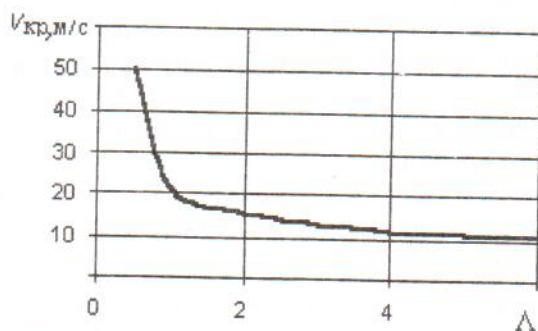


Рис. 4. Вплив подовження крила Λ на критичну швидкість $V_{кр}$

Отже, для отримання критичної швидкості флатера, меншої за 15 м/с, подовження крила повинно бути $\Lambda \geq 3$.

Істотну роль у виникненні коливань типу флатера відіграє відстань r від передньої кромки крила до його центра мас S (у нашому випадку $r=e$).

Віднесемо відстань r до хорди b і проаналізуємо, як при цьому зміняться основні характеристики перетворювача зі збільшенням r/b .

На рис. 5, а показано зміну критичної швидкості $V_{кр}$ залежно від відношення r/b .

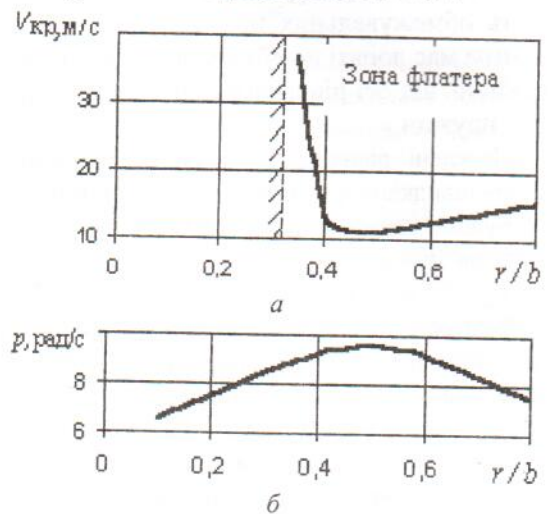


Рис. 5. Вплив відношення r/b на критичну швидкість $V_{кр}$ (а) і частоту p (б)

Якщо центр мас S знаходиться досить близько до передньої кромки профілю, то ні при якій швидкості вітру флатер неможливий.

Для виникнення самозбудних коливань необхідно, щоб відстань r була більшою за $0,3b$. У цьому випадку при віддаленні центра мас від носка профілю критична швидкість стрімко зменшується і досягає свого мінімального значення при $r = 0,45b$.

Подальше збільшення відстані r призводить до росту швидкості флатера.

Частота коливань лопаті поводить протилежно критичній швидкості.

Так, при r від $0,2b$ до $0,5b$ частота зростає (рис. 5, б).

Максимальне значення частоти спостерігається при $r=0,5b$, після чого досліджувана характеристика починає зменшуватися.

Отже, оптимальна відстань від передньої кромки профілю до центра мас крила, при якому швидкість флатера мінімальна, а частота коливань максимальна, дорівнює $r = (0,4 \dots 0,5)b$.

Вплив вагових параметрів флатерного перетворювача на критичну швидкість і частоту коливань зображений на рис. 6.

При зменшенні маси крила в n_m разів ($n_m < 1$) спостерігається збільшення швидкості флатера. Особливо стрімке зростання $V_{кр}$ відбувається при $n_m < 0,5$.

Збільшення маси крила в порівнянні з вихідними значеннями на критичну швидкість не відображується.

Частота коливань крила при пропорційній зміні маси змінюється в $1/\sqrt{n_m}$ разів, тобто чим більше маса, тим менше частота (рис. 6, б). Тому значне збільшення маси крилової лопаті небажане.

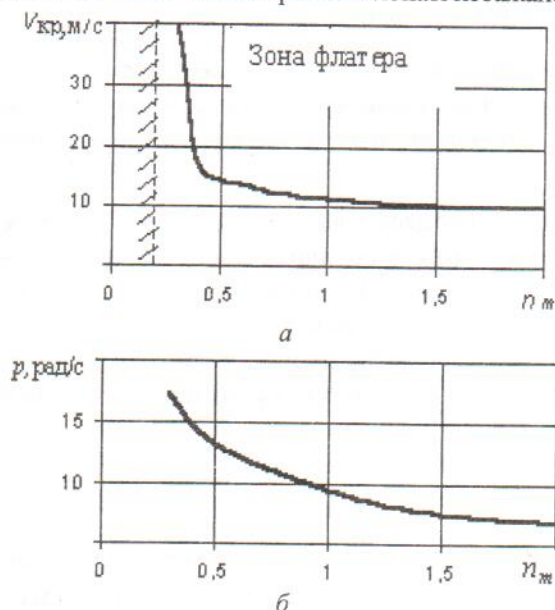


Рис. 6. Вплив маси крила на критичну швидкість $V_{кр}$ (а) і частоту p (б)

А.С. Крыжановский

Оптимизация работы флаттерного преобразователя

Рассмотрено влияние основных конструктивных параметров флаттерного преобразователя на критическую скорость флаттера и частоту колебаний рабочего органа. Определены оптимальные значения параметров, при которых критическая скорость будет минимальной, а частота колебаний максимальной.

A.S. Kryzhanovsky

Optimization of the operation of the flutter transducer

Dependence of the flutter critical speed and the oscillation frequency of the working organ upon the main constructional parameters of the flutter transducer is considered. Optimum values of the flutter transducer parameters that correspond to the minimum critical speed and the maximum oscillation frequency are determined.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють підібрати такі значення пружних, геометричних і вагових параметрів пристрою, при яких флаттерний перетворювач буде працювати при малих швидкостях вітру з максимально можливою частотою.

Список літератури

1. Патент № 20930А (Україна) F03Д 5/06. Вітро-гідродвигун / А.А. Цимбалюк. – № 93005379; Заявлено 14.06.93; Опубл. 27.02.98. Бюл. № 1.
2. Крыжановський А.С. Побудова математичної моделі флаттерного перетворювача при приєднанні до електричної машини // Сучасні авіаційні технології: Матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. "Авіа-2002", 25–26 квіт. 2002 р. – К.: НАУ, 2002. – С. 31.95–31.99.
3. Крыжановський А.С. Аеродинаміка робочого органу флаттерного перетворювача // Наука і молодь: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2003. – Вип. № 3. – С. 18–21.
4. Гроссман Е.П., Пановко Я.Г. Упругие колебания частей самолета. – Л.: ЛКВВИА, 1947. – 260 с.

Стаття надійшла до редакції 16.02.04.