

## СНИЖЕНИЕ BVI-ШУМА РОТОРА ВЕРТОЛЁТА С ПОМОЩЬЮ ЛОПАСТИ С ДВОЙНЫМ ИЗГИБОМ

П. В. ЛУКЪЯНОВ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

In this paper a problem of BVI-noise generation by twice-bent "sin-sin" -blade and vortex flux interaction is presented. The problem has been solved numerically with use of numerically-analytical approach. Analysis of calculated data discovered effective using of the "sin-sin" twice-bent for the noise suppression. In particular, it have been succeeded in 10-20 dB noise decreasing (in comparison with blade without bends) dependently both on calculation's parameters and point position on the blade. As a result, "sin-sin" blade can be considered as a low-noise "Blue Edge" type blade.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в вертолётостроении разрабатываются и внедряются современные экологически чистые "Blue Edge" технологии [1],[2]. В частности, компания Eurocopter финансирует исследования оптимальной формы лопасти ротора вертолётa, которая одновременно обладает надёжными аэродинамическими характеристиками и мало шумна в тоже время.

Цель настоящей работы состоит в дальнейшем поиске модификаций малозумных лопастей. Для этого предложена лопасть с двойным "sin-sin" изгибом, чтобы снизить генерируемый шум взаимодействия лопасти и вихрей (BVI-шум). Приведенные ниже результаты численных расчётов, свидетельствующие о том, что "sin-sin"-лопасть относится к малозумным лопастям "Blue Edge" – типа [1].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

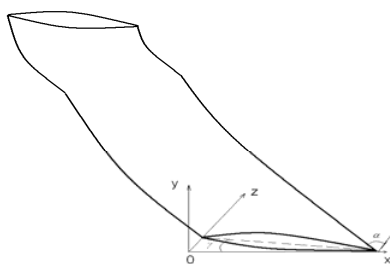


Рис.1 Лопасть с двойным "sin-sin" изгибом

Пусть есть лопасть (рис.1), форма которой в плоскости её размаха имеет два изгиба: первый изгиб в виде функции  $\sin$  в пределах изменения  $0 \leq z \leq 0.8R$ . Эта часть лопасти имеет форму половины основного периода функции  $\sin$ . При этом максимальная амплитуда изгиба, множитель при  $\sin$ , составляет 0.1;0.15;0.2. Таким образом, первый

изгиб лопасти выбирается не более 20%. Второй изгиб,  $0.8R \leq z \leq R$ , представляет собой четверть основного периода функции  $\sin$ , т.е. в 2 раза быстрее изменяется, чем первый изгиб, но амплитуду отклонения оставим той же, что и для первого изгиба.

На переднюю кромку лопасти набегаёт поток со скоростью  $U_\infty$  с распределёнными вдоль размаха лопасти вихрями Тэйлора. На внешнем конце лопасти формируется концевой вихрь Скулли. Таким образом, при взаимодействии течения с лопастью происходит генерация BVI-шума аэродинамического происхождения (физическая постановка задачи).

Для формулировки математической модели данной задачи положим, что течение вокруг лопасти идеальное сжимаемое, а тепловые изменения не влияют на формирование течения и генерируемого им звука. Пусть есть  $Oxyz$  - прямоугольная декартова система координат (рис.1). Лопать в произвольный момент времени повернута в плоскости вращения на некоторый угол  $\alpha$  и расположена под углом атаки  $\gamma$  к набегающему на неё потоку. Система уравнений, описывающая течение лопасти имеет вид:

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\nabla p, \operatorname{div}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{v}_n = \bar{0}. \quad (2)$$

Первое из уравнений – уравнение движения в форме Эйлера. Второе уравнение – уравнение неразрывности. На поверхности лопасти задаётся условие непроницаемости течения. Уравнения (1)–(2), вместе с распределениями вихрей Тэйлора и Скулли, представляют собой аэродинамическую задачу.

Акустическая задача описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - a^2 \Delta \rho' = \operatorname{div}[\rho(\nabla(\vec{V}\nabla\varphi)) + \rho'(\nabla(\frac{\vec{V}^2}{2}) + \vec{V}\nabla\varphi) + \rho \cdot (\nabla \times \vec{V}) \times \nabla\varphi + \rho' \cdot (\nabla \times \vec{V}) \times \vec{V}] + \operatorname{div}[\vec{V} \cdot \operatorname{div}(\rho\nabla\varphi + \rho'\vec{V})] + \operatorname{div}[\nabla\varphi \operatorname{div}\rho\vec{V}] + \nabla a^2 \cdot \nabla \rho', \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \nabla^2 \varphi + \nabla \varphi \cdot \nabla \rho + \rho' \operatorname{div} \vec{V} + \vec{V} \cdot \nabla \rho' = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (3)–(4)  $\rho', \varphi$  – малые возмущения плотности и звуковой потенциал. В начальный момент времени  $\rho', \varphi|_{t=0} = 0$ . Граничное условие (по скоростям) для звуковой волны включено в (2).

## МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Перед решением данной задачи автором был решен ряд нестационарных задач для прямоугольной лопасти. При этом использовался численно-аналитический подход [3,4], который показал способность решения подобного рода задач. При решении поставленной выше задачи для лопасти с двойным изгибом он также был успешно применён. Единственной отличительной особенностью было большее количество узлов, чем для прямоугольной лопасти: по поперечной координате (вдоль сечения лопасти) задавалось не 80, а 85 расчётных точек.

## БЛИЖНЕЕ ПОЛЕ

Для численного расчёта в качестве тестовой лопасти выбиралась лопасть, которая в поперечном сечении имеет форму параболы  $y = x(1-x)$  с относительным утолщением  $c/R = 0.1$ . При этом относительное удлинение составляло  $AR = R/c = 10$ . При расчёте характеристик ближнего поля использовались уравнения (1),(2),(4) в безразмерной форме. Нормирование выполнялось на параметры невозмущённого течения –  $U_\infty, \rho_\infty$ .

Для изучения генерации шума *sin*-образной лопастью при расчётах выбирались значения  $M = 0.2; 0.4; \delta = 0.1; 0.15; 0.2$ . Рассматривались два положения лопасти по отношению к набегающему потоку: под углами  $60^\circ$  и  $90^\circ$  (на рисунках случаи а) и б) – соответственно). Передняя кромка лопасти располагалась под углами атаки  $\gamma = 10^\circ; 5^\circ$  по отношению к плоскости вращения ротора. Все перечисленные комбинации параметров в данной работе нет возможности рассмотреть, поэтому остановимся лишь на некоторых из них.

На рис. 2 представлены пульсации безразмерной плотности  $\rho'$  для случая  $M = 0.2; \gamma = 10^\circ; \delta = 0.1$ . Наблюдается несколько серий пиков. Первая серия пиков чётко отображает *sin*-изгибы лопасти: на графике присутствуют два слегка изрезанные сверху пика, по форме напоминающие *sin*-образную волну. Изрезанность верхушки фронтов означает наличие неустойчивости в течении, которая в этих задачах всегда присутствует. Как видим, форма передней кромки лопасти определяет распределение энергии в первой серии пиков. Вторая серия пиков уже не имеет выраженную *sin*-образную форму. За ней, ближе к центру лопасти, заметны отдельные локальные всплески  $\rho'$  в виде двух диссипативных фронтов волны – поперечного и продольного. Амплитуды в них уже в 5-10 раз ниже амплитуд первой *sin*-образной серии. Для угла  $\alpha = 90^\circ$  синус-образная форма уже не формируется. Наблюдается лишь образование нескольких отдельных пиков и лишь один по своей форме отчасти напоминает искривлённую синус-волну. Для числа Маха  $M = 0.4$  (рис. 3) вторая серия фронтов вообще рассыпаются по поверхности лопасти. Амплитуда в них в 10-15 раз ниже амплитуды передних *sin*-образных фронтов. Причина такой диссипации очевидна: вихри, сталкиваясь с лопастью, сразу ещё сохраняют первоначальную концентрацию энергии, а затем диссипируют по поверхности лопасти.

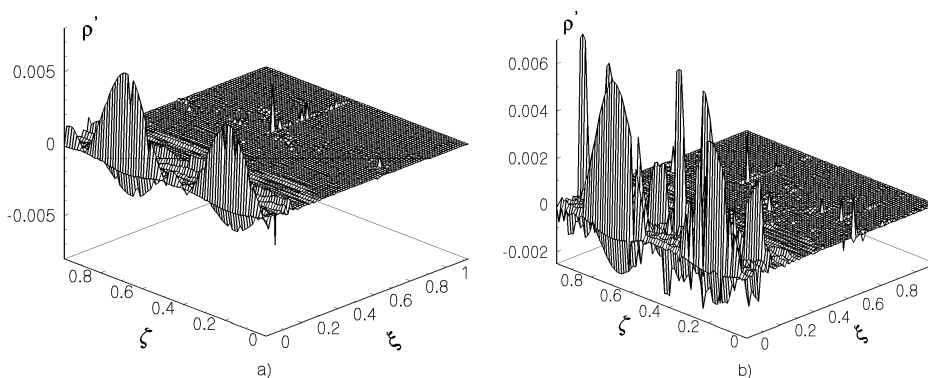


Рис. 2. Распределение пульсаций плотности  $M = 0.2, \gamma = 10^\circ, \delta = 0.1$

Если сравнить полученные результаты ближнего поля с ближним полем закруглённой лопасти [5], то мы видим, что у закруглённой лопасти не наблюдалась синус – образная форма  $\rho'$ , а лишь присутствовали отдельные резко выраженные пики.

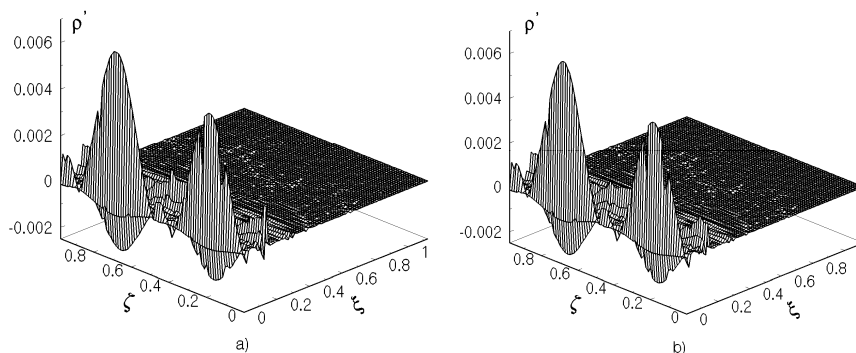


Рис. 3. Распределение пульсаций плотности  $M = 0.4, \gamma = 10^\circ, \delta = 0.1$

### ДАЛЬНЕЕ ПОЛЕ

В качестве расчётной формулы для анализа дальнего звукового поля используют подход Кирхгофа, на основании которого получено следующее представление дальнего поля [6]:

$$\varphi(x, t_1) = \frac{-M_1^2}{4\pi} \left( \int_s \left[ \frac{F_1}{R} \right]_t dS_x + \int_s [F_2]_t dS \right), \quad (5)$$

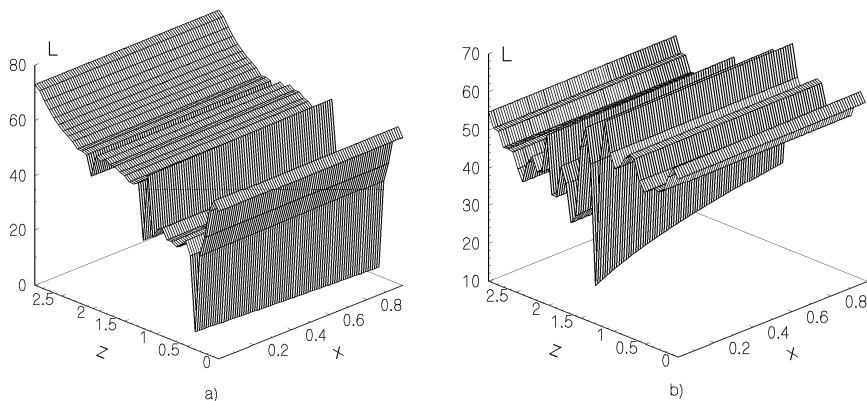
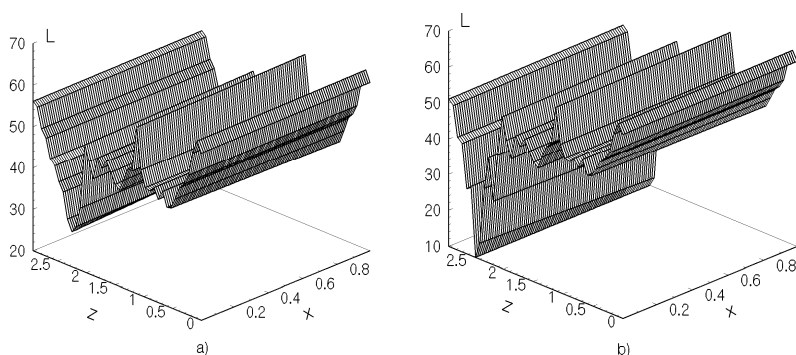
В выражении (5):

$$F_1 = \rho [(\nabla \varphi \cdot \nabla) \bar{v} + (\bar{v} \cdot \nabla) \cdot \nabla \varphi] + \rho' (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} + \bar{v} \cdot \text{div}(\rho \nabla \varphi + \rho' \bar{v}) + \nabla \varphi \text{div}(\rho \bar{v}),$$

$$F_2 = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \frac{1}{Ra_\infty} \frac{\partial R}{\partial n} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \varphi \frac{\partial(1/R)}{\partial n}.$$

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ДАЛЬНОГО ПОЛЯ

Особый интерес представляет уровень давления  $L$  генерируемого шума (рис.4-5). Лишь для значений параметров  $M = 0.2; \alpha = 60^\circ; \gamma = 10^\circ; \delta = 0.1$ , (рис.4а) максимум шума находится на внешнем конце лопасти. В случае  $M = 0.2; \alpha = 90^\circ; \gamma = 10^\circ; \delta = 0.1$  (рис.4б) он расположен ближе к центру лопасти, уровень  $L$  ниже на 10дБ. В остальных расчётных случаях (рис.5) максимальный уровень  $L$  находится в районе 60дБ. Кроме того, на внешнем от оси вращения конце лопасти он значительно ниже (в районе 40дБ), чем на остальной части лопасти вдоль по её размаху. А это означает, что изогнутая по “sin-sin” форме лопасть позволяет в большинстве расчётных случаев снизить концевой BVI-шум, что и составляло цель модификации формы лопасти. Очень близкие результаты по уровню шума были получены в работе [1] для изогнутой “Blue Edge” лопасти. Значение уровня шума находилось в пределах  $50\text{дБ} < L < 63\text{дБ}$ , что фактически соответствует описанным выше результатам данной работы.


 Рис. 4. Уровень звукового давления  $M = 0.2, \gamma = 10^\circ, \delta = 0.1$ 

 Рис. 5. Уровень звукового давления  $M = 0.4, \gamma = 10^\circ, \delta = 0.1$ 

Сложная нелинейная картина  $L$  отразилась в частотном спектре генерируемого шума (рис.6-7). Изрезанность огибающей спектра шума соответствует чередующимся максимумам-минимумам нелинейной волны давления. Судя по уровню гармоник в спектре, наиболее энергоёмкими являются первые 5-6 гармоник. Кроме этого заметна локальная активизация высоких частот: на всех графиках спектра в районе 830Гц наблюдается целая серия локальных всплесков достаточно высокого уровня (10дБ), что подтверждает природу вихревого шума как такового, чья энергия распределена более равномерно в частотном спектре. Напомним, что в случае, когда шум является преимущественно шумом вращения (монопольно-дипольный), его энергия сконцентрирована в первых 2-3 гармониках, чем он и различается от вихревого шума.

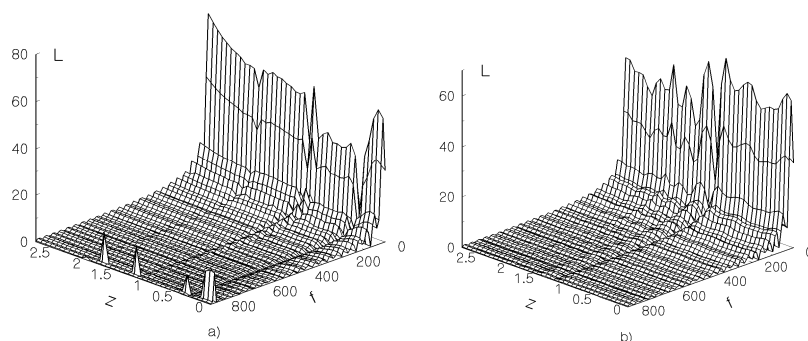


Рис. 6. Частотный спектр генерируемого шума  $M = 0.2, \gamma = 10^\circ, anm = 0.1$

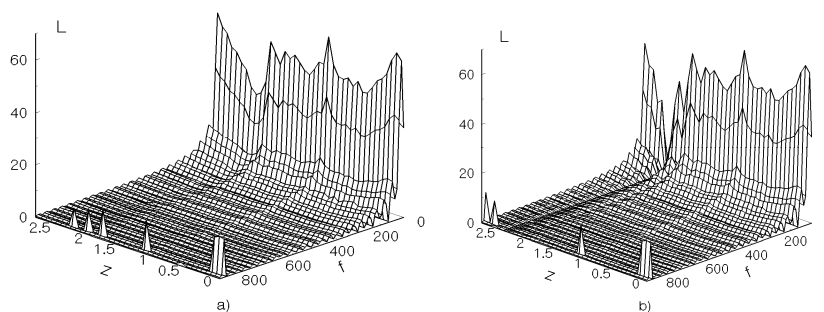


Рис. 7. Частотный спектр генерируемого шума  $M = 0.4, \gamma = 5^\circ, anm = 0.1$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено поведение генерируемого “*sin-sin*” лопастью “BVI“-шума для различных значений изгиба лопасти, углов постановки лопасти к потоку, чисел Маха. Выявлено ряд интересных закономерностей. В частности, с помощью изгибов лопасти удалось снизить максимальный уровень шума, который наблюдался у неизогнутой лопасти на её конце, сделать более равномерным распределение шума по всей поверхности лопасти. При этом снижение общего уровня шума составило порядка 10-20дБ в зависимости от расчётной ситуации и области на поверхности лопасти. Звуковая энергия при этом уже концентрируется не в 2-3 первых гармониках, а в 5-6 гармониках. Наблюдается также и более активный захват энергии в высокочастотной области (830Гц). Продольная модификация формы лопасти является эффективной для снижения BVI-шума.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *P.Rauch, M.Geravais, P.Cranda, A.Baud, J.-F.Hirsch, A.Walter, P.Beaumier*. Blue Edge<sup>TM</sup> : The Design, Development and Testing of a New Blade Concept // American Helicopter Society 67<sup>th</sup> Annual Forum, Virginia Beach, VA, May 3–5, 2011. – 14 p.
2. *Bryans Edwards and Charles Cox*. Revolutionary Concepts for Helicopter Noise Reduction-S.I.L.E.N.T. Program.// NASA/CR-2002-211650. – 86 p.

3. *3. Лукьянов П.В.* Об одном численно-аналитическом подходе к решению задачи генерации звука тонким крылом. Часть I. Общая схема применения для плоской стационарной задачи // Акустичний вісник – 2011. – Том 14, № 3. – С. 46–52.
4. *4. Лукьянов П.В.* Об одном численно-аналитическом подходе к решению задачи генерации звука тонким крылом. Часть II. Схема применения для нестационарных задач // Акустичний вісник. – 2012. – Том 15, № 3. – С. 45-52.
5. *Лукьянов П.В.* Влияние закругления конца лопасти на уровень шума взаимодействия вихрь-лопасть. // Акустичний вісник. – 2015. – Том 17, № 2. – С. 23–37.
6. *Лукьянов П.В.* Об одной модели аэроакустики сжимаемого газа. Часть II. Шум ближнего взаимодействия вихря-лопасти вертолёта // Акустичний вісник. – 2013-2014. – Том 16, № 3. – С. 31–40.