

УДК 534.23

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ВИНТОМ САМОЛЕТА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ИДЕАЛЬНОЙ ЛОПАСТИ

А.М. ДЖЕКИ, А.С. ГЕЙСТЕР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 26 мая 2008

Описываются физические основы формирования акустической волны воздушным дозвуковым винтом легкомоторного самолета, а также математическая модель распределения давления вдоль вращающейся лопасти винта для зон повышенного и пониженного давления. Представляется оригинальная методика определения и математическая модель временной структуры акустического сигнала, формируемого идеальной лопастью.

Ключевые слова: воздушный винт, акустический сигнал.

Введение

Обнаружение легкомоторных летательных аппаратов (вертолетов и легкомоторных самолетов) на малых и предельно малых высотах является важной задачей. В приграничной зоне мониторинг малых высот осуществляется с целью пресечения ввоза наркотиков и контрабандных товаров, вывоза ценностей, а также исключения незаконного пересечения границы воздушным путем. Решение задачи мониторинга на малых и предельно малых высотах с использованием радиолокационных средств затруднено объективными факторами [1, 2], связанными с негативным влиянием земной поверхности на распространение радиоволн, низкой радиолокационной заметностью и малыми скоростями движения легкомоторных летательных аппаратов (ЛА). Это обуславливает необходимость разработки и создания новых эффективных средств обнаружения, в которых используются естественные физические явления, возникающие при полете легкомоторных ЛА на малых и предельно малых высотах. Одним из таких явлений является звук, порождаемый воздушными винтами.

Физические основы формирования акустического сигнала винтом самолета

На летательном аппарате тяга двигательной установки создается либо непосредственно за счет реакции струи, вытекающей из сопла двигателя, либо с помощью специального аэродинамического преобразователя — воздушного винта. Воздушный винт при вращении отбрасывает своими лопастями массу воздуха, проходящую через плоскость вращения винта, назад с увеличенной скоростью. За счет реактивного действия отбрасываемой массы воздуха на лопасти создается тяга винта [3].

В легкомоторных самолетах и вертолетах используются дозвуковые винты, которые при заданном диаметре имеют такое число оборотов, при котором результирующая скорость, равная сумме окружной скорости вращения винта и скорости полета, во всех сечениях лопастей

винта остается дозвуковой. Так как максимальная окружная скорость винта соответствует концу лопасти, то в данном случае рассматривается концевая скорость

$$V_K = 2\pi R_L / T_V, \quad (1)$$

где R_L — радиус винта; T_V — период вращения винта.

На рис. 1 изображена модель двухлопастного винта, в котором лопасти, представленные прямоугольными пластинами, характеризуются относительно наблюдателя как приближающаяся и удаляющаяся. Воздействие на воздух происходит: во-первых, при "набеге" лопасти и проявляется как в сжатии воздуха на передней стороне лопасти, так и в его перемещении; во-вторых, в разрежении воздуха на обратной стороне лопасти.

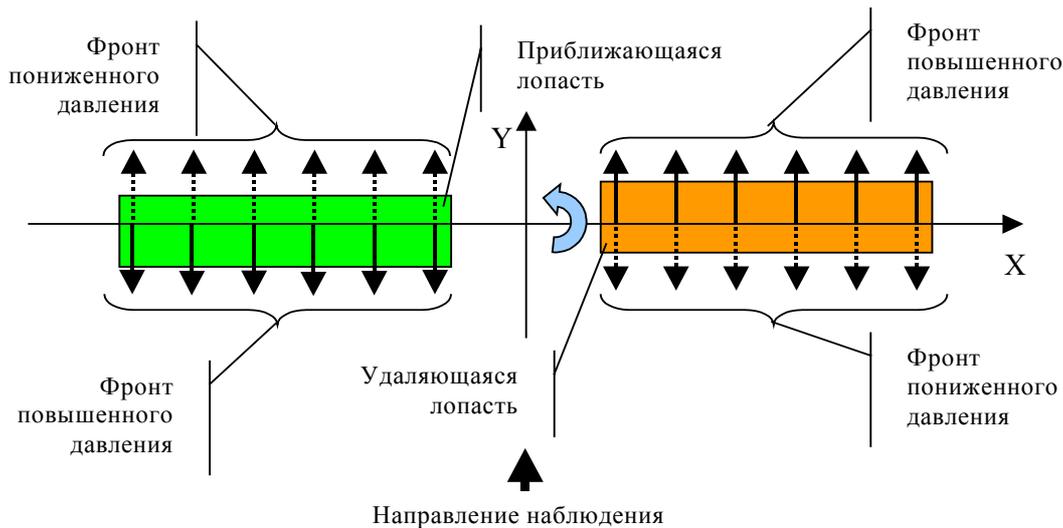


Рис. 1. Модель двухлопастного винта

Для определения картины возмущения воздуха, возникающего при создании аэродинамической силы на лопасти, необходимо в первую очередь знать распределение давления по поверхности лопасти. Изменение давления в произвольной точке на поверхности лопасти по сравнению с давлением невозмущенного потока оценивают [3] коэффициентом давления

$$\bar{p} = (p - p_\infty) / \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

где $(p - p_\infty)$ — избыточное (возмущенное) давление в данной точке на поверхности лопасти; $\rho V^2 / 2$ — скоростной напор (давление) невозмущенного потока плотностью ρ при скорости движения анализируемой точки поверхности V .

Определение распределения давления по поверхности реальной лопасти является сложным процессом, сочетающим как теоретические, так и экспериментальные исследования. Однако основные особенности формирования акустической волны воздушным винтом можно рассмотреть на примере идеальной лопасти, для которой предполагается отсутствие:

вихревых потоков, возникающих при затекании воздуха из зоны повышенного давления в зону пониженного давления на обратную сторону лопасти;

затекания воздуха из зоны повышенного давления в зону пониженного давления на краю лопасти.

Математическая модель временной структуры акустического сигнала идеальной лопасти

Приближающаяся идеальная лопасть. Оценим распределение давления в продольном сечении приближающейся идеальной лопасти. Для этого избыточное давление под вращающейся лопастью в произвольной точке, расположенной на расстоянии r_{s-L} от оси винта и движущейся со скоростью V_{s-L} , со стороны набегающего невозмущенного потока можно представить в виде

$$\Delta p_n(r_{s-L}) = (p_n(r_{s-L}) - p_\infty) = k_{p-\alpha}^n \frac{\rho V_{s-L}^2}{2}, \quad (3)$$

где $k_{p-\alpha}^n$ — коэффициент, учитывающий угол атаки набегающей лопасти в точке.

С учетом того, что скорость движения точки лопасти $V_{s-L} = 2\pi r_{s-L} / T_V$, на рис. 2 для приближающейся идеальной лопасти представлены закон изменения скорости точек $V(r_{s-L})$ на лопасти и закон распределения избыточного давления $\Delta p_n(r_{s-L})$ вдоль лопасти.

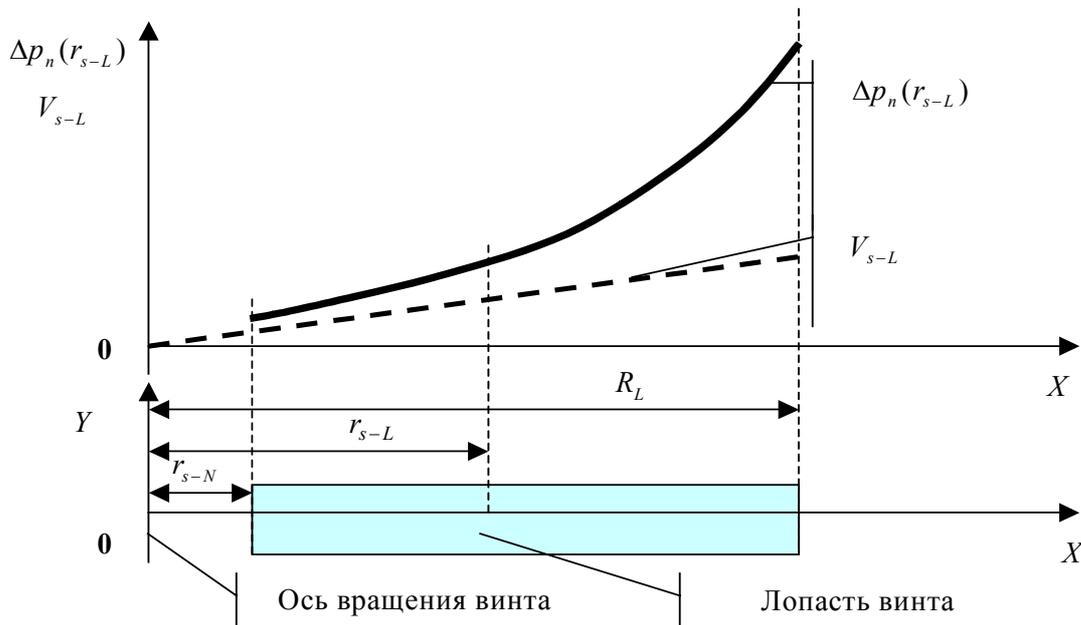


Рис. 2. Изменение скорости точек и избыточного давления вдоль лопасти

Звуковая волна в фазе повышенного давления, формируемая приближающейся лопастью, распространяется в соответствии с фронтом повышенного давления. Фронт и уровень избыточного давления определяются квадратичной функцией (3), что свидетельствует об отсутствии у лопасти, являющейся акустической излучающей антенной, единого фазового центра. Прием акустической волны осуществляется в дальней зоне, применительно к которой действует [1] фильтрующее свойство пространства. Пренебрегая временем распространения звуковой волны, это свойство заключается в том, что в данный момент в точку приема приходит волна, соответствующая фрагменту фронта давления, перпендикуляр к которому в данный момент совпадает с направлением на точку приема.

На рис. 3 (вид сверху) представлены пояснения к определению точки излучения на линии фронта избыточного давления для приближающейся идеальной лопасти.

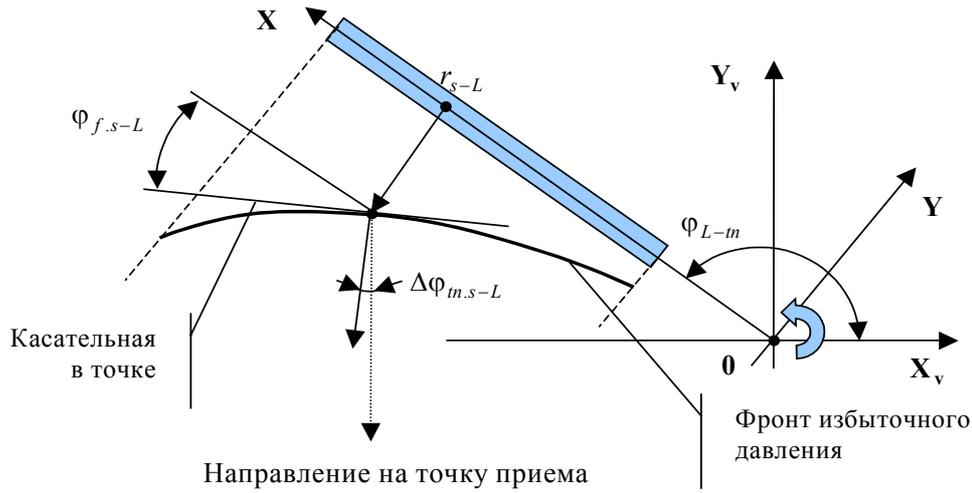


Рис. 3. Определение точки излучения на линии фронта избыточного давления: X_0Y_0 — прямоугольная система координат лопасти; X_v0Y_v — прямоугольная система координат, связанная с направлением на точку приема; $\varphi_{f.s-L}$ — угол между касательной к фронту давления для точки лопасти, расположенной на расстоянии r_{s-L} от оси вращения, и осью лопасти; φ_{L-tm} — угловое положение оси лопасти относительно оси X_v , перпендикулярной направлению на точку приема; $\Delta\varphi_{m.s-L} = (\varphi_{f.s-L} - (\pi - \varphi_{L-tm}))$ — угловое рассогласование для точки анализа, расположенной на расстоянии r_{s-L} от оси вращения

Точка лопасти, излучение которой для текущего положения лопасти придет в точку наблюдения, характеризуется касательной к фронту избыточного давления, перпендикуляр к которой соответствует направлению на точку приема. В математическом виде условие приема сигнала повышенного давления, формируемого в точке анализа на расстоянии r_{s-L} , представляется выполнением равенства $\Delta\varphi_{m.s-L} = 0$, где $\varphi_{f.s-L} = (\pi - \varphi_{L-tm})$.

Найдем аналитическое описание неизвестного угла $\varphi_{f.s-L}$ для каждой точки приближающейся лопасти, что позволит найти форму акустического сигнала в точке приема при вращении лопасти. Для этого воспользуемся коэффициентом давления

$$\overline{p_n(r_{s-L})} = \frac{\Delta p_n(r_{s-L})}{\Delta p_{n-\max}}, \quad (4)$$

характеризующим распределение давления вдоль лопасти (см. выражение (3)) с нормировкой относительно максимального значения $\Delta p_{n-\max}$, соответствующего точке на конце лопасти:

$$\Delta p_{n-\max} = \Delta p_n(R_L) = k_{p-\alpha}^n \frac{\rho V_K^2}{2} = k_{p-\alpha}^n \frac{\rho 2\pi^2 R_L^2}{T_V^2}, \quad (5)$$

где V_K — концевая скорость лопасти, определяемая выражением (1).

С учетом (3) избыточное давление $\Delta p_n(r_{s-L})$ в точке лопасти, находящейся на расстоянии r_{s-L} от оси вращения, определяется выражением

$$\Delta p_n(r_{s-L}) = k_{p-\alpha}^n \frac{\rho 2\pi^2 r_{s-L}^2}{T_V^2}. \quad (6)$$

Коэффициент давления $\overline{p_n(r_{s-L})}$, характеризующий относительное распределение давления вдоль лопасти, является отношением выражений (6) и (5):

$$\overline{p_n(r_{s-L})} = \frac{\Delta p_n(r_{s-L})}{\Delta p_{n-\max}} = \frac{r_{s-L}^2}{R_L^2}. \quad (7)$$

Для нахождения угла $\varphi_{f.s-L}$ необходимо взять производную от $\overline{p_n(r_{s-L})}$ по r_{s-L} , которая определяется выражением

$$\overline{p_n(r_{s-L})}' = \frac{d \overline{p_n(r_{s-L})}}{dr_{s-L}} = 2 \frac{r_{s-L}}{R_L^2}. \quad (8)$$

С учетом этого искомым углом $\varphi_{f.s-L}$ для любой точки идеальной лопасти, находящейся на расстоянии r_{s-L} от оси вращения, определяется как

$$\varphi_{f.s-L} = \arctg\left(\overline{p_n(r_{s-L})}'\right) = \arctg\left(2 \frac{r_{s-L}}{R_L^2}\right). \quad (9)$$

С учетом того что угол $\varphi_{f.s-L}$ изменяется монотонно, получим начальное $\varphi_{f.s-N}$ и конечное $\varphi_{f.s-K}$ значения этого угла для идеальной приближающейся лопасти, при которых соответственно начинается и заканчивается формирование избыточного давления в направлении на точку приема. С учетом выбранной системы координат (рис. 3)

$$\varphi_{f.s-N} = \arctg\left(\overline{p(R_L)}'\right) = \arctg\left(\frac{2}{R_L}\right), \quad \varphi_{f.s-K} = \arctg\left(\overline{p(r_{s-N})}'\right) = \arctg\left(2 \frac{r_{s-N}}{R_L^2}\right). \quad (10)$$

На основании выражения (9) для текущего углового положения лопасти φ_{L-in} можно найти точку на лопасти, излучение которой соответствует направлению приема. Расстояние до этой точки определяется выражением

$$r_{L-in} = \frac{R_L^2}{2} \operatorname{tg}(\pi - \varphi_{L-in}), \quad (11)$$

а уровень избыточного давления равен

$$\Delta p_{in}(r_{L-in}) = k_{p-\alpha}^n \frac{\rho 2 \pi^2 r_{L-in}^2}{T_V^2}. \quad (12)$$

Угловое положение лопасти φ_{L-in} при вращении изменяется равномерно в соответствии со скоростью вращения $\Omega_V = 2\pi/T_V$ и в выбранной системе координат (см. рис. 3) в момент времени t равно $\varphi_{L-in}(t) = t\Omega_V$. Абсолютное значение t_r времени задержки акустического сигнала при распространении его от лопасти до точки приема в случае пассивной локации не играет большого значения, поэтому в целях упрощения опустим его из рассмотрения. С учетом этого математическая модель временной структуры акустического сигнала $p_{pr}(t)$, формируемого приближающейся идеальной лопастью, в точке приема описывается выражением

$$p_{pr}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq t < t_{f.s-N}; \\ k_{rt} k_{p-\alpha}^n \frac{\rho \pi^2 R_L^4}{T_V^2} \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2(\pi - t\Omega_V) & \text{при } t_{f.s-N} \leq t \leq t_{f.s-K}; \\ 0 & \text{при } t_{f.s-K} < t, \end{cases} \quad (13)$$

где k_{rt} — коэффициент, учитывающий уменьшение уровня давления при распространении на трассе "летательный аппарат – точка приема"; $t_{f.s-N} = (\pi - \varphi_{f.s-N}) \frac{1}{\Omega_V}$ — время начала формирования акустического давления при угловом положении лопасти $\varphi_{L-tm} = (\pi - \varphi_{f.s-N})$, которое отсчитывается с момента $t = 0$, при котором $\varphi_{L-tm} = 0$; $t_{f.s-K} = (\pi - \varphi_{f.s-K}) \frac{1}{\Omega_V}$ — время окончания формирования давления при угловом положении лопасти $\varphi_{L-tm} = (\pi - \varphi_{f.s-K})$.

Удаляющаяся идеальная лопасть. При удалении лопасти на ее обратной стороне формируется зона разреженного давления, фронт которой вдоль идеальной лопасти также можно описать квадратичной функцией. По аналогии с приближающейся лопастью можно получить математическую модель временной структуры акустического сигнала $p_{ud}(t)$, формируемого удаляющейся идеальной лопастью. Выражение для этого сигнала в точке приема имеет вид

$$p_{ud}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq t < t_{f.s-NV} ; \\ -k_{rt} k_{p-\alpha}^v \frac{\rho \pi^2 R_L^4}{T_V^2} \frac{1}{2} t g^2(t \Omega_V) & \text{при } t_{f.s-NV} \leq t \leq t_{f.s-KV} ; \\ 0 & \text{при } t_{f.s-KV} < t , \end{cases} \quad (14)$$

где $k_{p-\alpha}^v$ — коэффициент, учитывающий угол атаки удаляющейся лопасти; $t_{f.s-NV} = \frac{\varphi_{f.s-NV}}{\Omega_V}$ — время начала формирования акустического сигнала пониженного давления при угловом положении лопасти $\varphi_{L-tm} = \varphi_{f.s-NV}$, причем время отсчитывается с момента $t = 0$, при котором $\varphi_{L-tm} = 0$; $t_{f.s-KV} = \frac{\varphi_{f.s-KV}}{\Omega_V}$ — время окончания формирования акустического сигнала пониженного давления при $\varphi_{L-tm} = \varphi_{f.s-KV}$.

С учетом выбранной системы координат (рис. 3)

$$\varphi_{f.s-NV} = \arctg \left(\overline{p(r_{s-N})}' \right) = \arctg \left(2 \frac{r_{s-N}}{R_L^2} \right), \quad \varphi_{f.s-KV} = \arctg \left(\overline{p(R_L)}' \right) = \arctg \left(\frac{2}{R_L} \right). \quad (15)$$

Формулы (13) и (14) позволяют математически описать временную структуру акустических сигналов, формируемых идеальной приближающейся и удаляющейся лопастью соответственно, в точке приема.

Заключение

Одним из физических явлений, которое может быть использовано для обнаружения легкомоторных летательных аппаратов на малых и предельно малых высотах, является возникновение звуковых колебаний. При полете винтового самолета акустические колебания или акустические волны создаются лопастями воздушного винта. Возле перемещающейся лопасти возникают поля повышенного и пониженного давления, что при круговом движении лопасти приводит к формированию двухполярного акустического сигнала. Описание этих полей является сложной задачей, при решении которой используются как теоретические, так и экспериментальные исследования. В данном случае разработана математическая модель временной структуры акустического сигнала, создаваемого идеальной лопастью. В дальнейшем эта модель

может быть использована для описания реальных лопастей, а также для построения алгоритмов обнаружения летательных аппаратов по их акустическим сигналам.

**BASIC PHYSICS OF ACOUSTIC WAVE FORMING PERFORMED
BY THE AIRCRAFT PROPELLER AND MATHEMATICAL MODEL
OF ACOUSTIC SIGNAL TIME STRUCTURE OF THE IDEAL BLADE**

ABDUALLA MOHAMED JAKI, A.S. HEISTER

Abstract

Basic physics of acoustic wave forming performed by a small engine plane are described. Mathematical model of pressure distribution along the rotating propeller blade in pressure and depression zones is considered. Original method of determination and mathematical model of acoustic signal time structure formed by the ideal blade are represented.

Литература

1. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М., 1983. Ч. 1.
2. *Гейстер С.Р.* Системное проектирование и расчет радиолокаторов противовоздушной обороны. Минск, 1999. Ч. 1.
3. *Вотяков В.Д.* Аэродинамика летательных аппаратов и гидравлика их систем: Учеб.: В 2 ч. 1972. Ч. 1.