



УДК 534.23

Е.Я. Бубнов, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ЗВУК ВРАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ВИНТА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛОПАСТЕЙ ПО КОНУСНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ключевые слова: вертолетный винт, конусность, акустическое излучение

Проведен расчет звука вращения винта, лопасти которого движутся по образующей конуса. Для такого винта появляется дополнительный силовой источник звука, который существенно изменяет акустические характеристики излучения. Выполнена физическая интерпретация полученных результатов

Винт является сложным источником акустического излучения в широком диапазоне частот. В качестве значимых механизмов можно выделить процессы вихреобразования, возникающих при обтекании потока лопастей винта, вытеснение лопастями за счет конечного объема окружающей среды, воздействие на среду постоянных и переменных сил. Существует большое число работ по указанным источникам шумообразования [1-3]. Показано, что основной вклад в низкочастотное дискретное излучение, которое называется звуком вращения, вносят стационарные в связанной с лопастями системе координат силы тяги и сопротивления. В проведенных исследованиях считалось, что лопасти винта вращаются в плоскости. Особенностью некоторых видов винтов в частности вертолетных является движение лопастей по образующей конусной поверхности, что связано с шарнирным креплением лопастей к оси вала. Для характеристики такого винта введем угол γ между продольной осью лопасти и плоскостью, перпендикулярной к оси вращения винта, который называется углом конусности. Величина угла конусности для вертолетных винтов изменяется в пределах от 7 до 15° .

Для сравнения на рис. 1 приведены самолетный и вертолетный винты и для каждого из них указаны элементарные силы тяги и сопротивления. На рис. 1, *b* изображены элементарная сила тяги $d\mathbf{T}$, действующая со стороны лопасти вертолетного винта на элемент среды $RdRd\theta\cos\gamma$ перпендикулярно образующей конической поверхности ($d\mathbf{Q}$ – элементарный момент сил). В отличие от случая движения лопастей в плоскости, вращение лопастей по конусной поверхности приводит к появлению еще одной силы. Действительно, в этом случае сила тяги $d\mathbf{T}$ раскладывается на проекцию силы $dT_{\parallel} = dT\cos\gamma$, которая аналогично силе тяги самолетного винта и параллельна оси z и дополнительную проекцию силы $dT_{\perp} = dT\sin\gamma$, перпендикулярную к оси z . Если угол конусности γ равен нулю, то сила dT_{\perp} равна нулю.

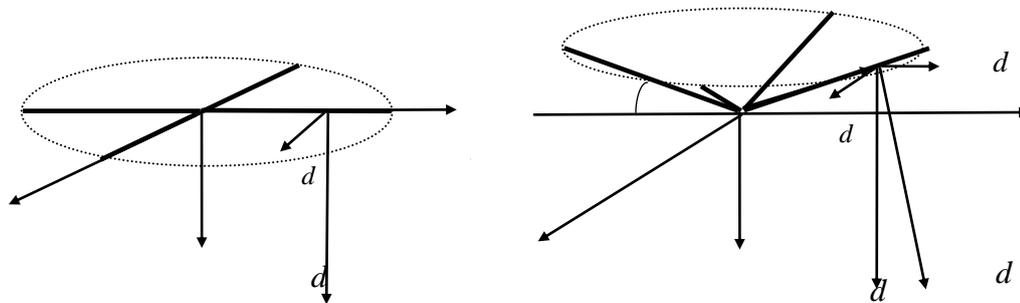


Рис. 1. Расположение самолетного (а) и вертолетного (b) винтов в декартовой системе координат

Проведем расчет звука вращения вертолетного винта с учетом влияния дополнительной силы тяги. Решение поставленной задачи проводится по методу, описанному в работе [1], по которому винт заменяется распределением силовых источников, расположенных в нашем случае по образующей конуса и имеющих соответствующие амплитуды и фазы. Проекции элементарных сил тяги и сопротивления на оси x , y , z можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 dF_x &= dT \sin \gamma \sin \theta + \frac{dQ}{R} \cos \theta \\
 dF_y &= dT \sin \gamma \cos \theta - \frac{dQ}{R} \sin \theta \\
 dF_z &= dT \cos \gamma
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где угол θ отсчитывается от линии пересечения плоскости (y, z) с конусной поверхностью до продольной оси лопасти.

Из-за периодического вращения лопастей проекции сил выражения (1), действующих на элемент среды $RdRd\theta \cos \gamma$, можно разложить в ряд Фурье.

$$\begin{aligned}
 F_{xm} &= \left(\frac{1}{\pi} \frac{dT}{dR} \sin \gamma \sin \theta + \frac{1}{\pi R} \frac{dQ}{dR} \cos \theta \right) dR d\theta \cos \gamma e^{-i(\omega_m t - m n \theta)} \\
 F_{ym} &= \left(\frac{1}{\pi} \frac{dT}{dR} \sin \gamma \cos \theta - \frac{1}{\pi R} \frac{dQ}{dR} \sin \theta \right) dR d\theta \cos \gamma e^{-i(\omega_m t - m n \theta)} \\
 F_{zm} &= \frac{1}{\pi} \frac{dT}{dR} \cos \gamma dR d\theta \cos \gamma e^{-i(\omega_m t - m n \theta)}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где n – число лопастей винта, m – номер гармоники. Амплитуды гармоник сил тяги и сопротивления не зависят от их номера, что связано с предположением о значительной величине скважности импульсов нагрузки.

Давление в произвольной точке x, y, z , создаваемое точечной элементарной силой определяется по формуле [4]

$$p = -\frac{1}{4\pi} \left(F_{xm} \frac{d}{dx} + F_{ym} \frac{d}{dy} + F_{zm} \frac{d}{dz} \right) \frac{e^{-ik_m r}}{r},
 \tag{3}$$

где $k_m = \frac{m\omega_1}{c}$, $r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}$, ω – угловая скорость вращения лопастей, x, y, z – координаты точки наблюдения, x_1, y_1, z_1 – координаты точки действия силы.

Связь декартовых координат точки приложения сил с переменными R, θ, γ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= R \sin \theta \\
 y_1 &= R \cos \gamma \cos \theta, \\
 z_1 &= -R \sin \gamma
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Проводя дифференцирование соотношения (3) по переменным x, y, z , и предполагая, что аэродинамические нагрузки сосредоточены на кольце радиуса R_c , в результате интегрирования по образующей конуса получаем аналитическое выражение для амплитуды m -гармоники давления в дальней зоне:

$$\begin{aligned}
 P_m &= \frac{m \omega_1 \cos \gamma}{2\pi c r_0} |T^2 \sin^2 \gamma \cos^2 \varphi I_{mn}'(\frac{m \omega_1 R_c \cos \gamma \cos \varphi}{\tilde{n}}) + (\frac{Qnc}{\omega_1 R_c^2 \cos \gamma} + T \cos \gamma \sin \varphi)^2 \times \\
 &\times I_{mn}^2(\frac{m \omega_1 R_c \cos \gamma \cos \varphi}{\tilde{n}})|^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где I_{mn} и I_{mn}' - соответственно, функция Бесселя первого рода $m n$ порядка и его первая производная. В выражении (5) проведена замена декартовых координат x, y, z точки наблюдения на полярные координаты $x = r_0 \cos \varphi, z = r_0 \sin \varphi$, где $r_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$ - расстояние от оси винта до точки наблюдения, φ - полярный угол, отсчитываемый от оси x в плоскости xz .

Если в формуле (5) положить $\gamma = 0$, то оно перейдет в известное соотношение работы [1]

$$P_m = \frac{m \omega_1}{2\pi c r_0} |(\frac{Qnc}{\omega_1 R_c^2} + T \sin \varphi) I_{mn}(\frac{m \omega_1 R_c \cos \varphi}{\tilde{n}})|$$

Уравнение (5) позволяет провести математическое моделирование характеристик акустического излучения. На рис 2 приведены нормированные диаграммы направленности первой гармоники звукового давления, создаваемого винтом в плоскости x, z для трех значений угла конусности.

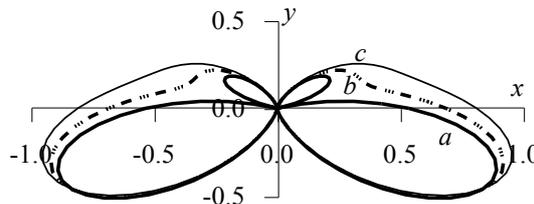


Рис. 2. Диаграммы направленности первой гармоники давления звука вращения неподвижного винта для трех значений угла конусности ($a - \gamma = 0^\circ, b - \gamma = 10^\circ, c - \gamma = 15^\circ$)

Как следует из анализа кривых рис. 2 наличие угла конусности существенно изменяет диаграмму направленности акустического излучения. Она уширяется и приобретает двухлепестковый вид, в отличие от четырехлепестковой диаграммы в случае вращения лопастей в плоскости. Физически существенная трансформация углового распределения давления объясняется тем, что малая по величине дополнительно возникающая сила тяги dT_{\perp} при $\gamma > 0$, имеет дипольный характер излучения и дает приблизительно такой же вклад в акустическое поле, как и доминирующая по величине квадрупольная составляющая силы тяги dT_{\parallel} . Расчет показывает, что при изменении угла конусности от 0 до 15 акустическая мощность излучения за счет этого источника увеличивается приблизительно в 2 раза.

Заключение

Вращение лопастей винта по образующей конусной поверхности приводит к дополнительному источнику звука, который существенно изменяет акустические характеристики за счет появления более эффективного дипольного механизма излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутин, Л.Я. О звуковом поле вращающегося воздушного винта / Л.Я. Гутин // ЖТФ. – 1936. - Т. 6, вып. 5. - С. 899–909.
2. Голдстейн, М.Е.. Аэроакустика / М.Ф. Голдстейн; пер. с англ. Р.К. Каравосова и Г.П. Караушева; под ред. А.Г. Мунина. – М.: Машиностроение, - 1981. – 294 с.
3. Авиационная акустика: В 2-х ч. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / А.Г. Мунин [и др.]; под общей ред. А.Г. Мунина. - М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
4. Бубнов, Е.Я. Акустические характеристики движущегося воздушного винта / Аэроакустика // Труды XIX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2007. - Т.3 - С. 300 - 303.