

Онушкин Ю.П., Островой А.В. Моделирование отрывного обтекания ветровой турбины: с вертикальной осью методом дискретных вихрей// Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Тез. докл. Межд. сем. 28-30 мая 2001г – СПб, 2001. – С.172 – 175.

УДК 629.7.

Полынцев О.Е.

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ РОТОРА АВТОЖИРА НА КАЧАЛКЕ

Рассматривается случай двухлопастного ротора автожира на качалке с вертикальным выносом y_0 , имеющего конструктивно задаваемый угол конусности α_0 и не имеющего вертикальных шарниров. Основные допущения: режим полета горизонтальный установившийся; элементы ротора автожира предполагаются абсолютно жесткими; не учитывается циклическое управление несущим винтом (НВ).

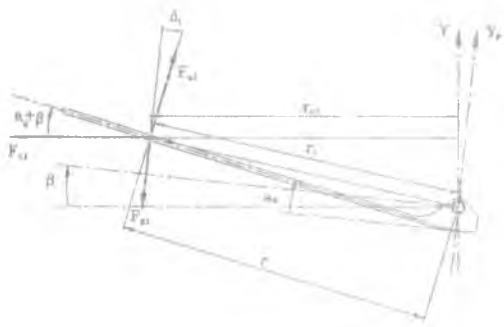


Рис.1

В полете автожира вследствие асимметрии обтекания ротора на отступающую и наступающую лопасти действуют аэродинамические силы разной величины. Вследствие наличия качалки НВ при вращении совершает маховое движение, что оказывает существенное влияние на динамику вращательного движения лопастей.

Рассмотрим обтекание элемента лопасти длиной dr и хордой b , на произвольно выбранном расстоянии r от оси качалки (рис. 1). Возникающая суммарная аэродинамическая сила R_a отклонена относительно плоскости взмаха на угол γ , и образует две проекции: силу тяги $T = R_a \cos \gamma$ (сумма которых по ротору дает подъемную силу НВ) и продольную силу $H = R_a \sin \gamma$. Сила H вызывает ускорение или замедление элемента лопасти в плоскости вращения; элементарный момент этой силы $M_y = Hr_c$, где r_c – расстояние от элемента до оси вращения.

Если просуммировать по длине лопасти эти элементарные моменты, можно получить момент, подкручивающий или замедляющий лопасть НВ $M_{y_k} = \int_0^{BR} M_y dr$, где k – номер лопасти,

R – радиус НВ; B – коэффициент концевых потерь НВ, который можно определять согласно [3,5]. Для каждого азимутального положения сумма этих моментов представляет собой момент, замедляющий или ускоряющий ротор НВ $M_a = M_{y1} + M_{y2}$, а их разность – момент, замыкающийся на втулке:

$$M_y = \frac{M_{y1} - M_{y2}}{2}.$$

Полная аэродинамическая сила: $R_a = C_R S_p \rho U^2 / 2$. Местный угол атаки: $\alpha = \varphi + \Phi$, где φ – местный угол установки, $\Phi = \arctg(U_y / U_x)$ – местный угол притекания потока; $S_p = b_r dr$ – площадь элемента. Компоненты полной скорости определяются для лопасти 1 (в произвольном азимуте ψ):

$$U_y = V \sin \alpha_p \cos(a_0 + \beta) - V \cos \alpha_p \sin(a_0 + \beta) \cos \psi - \frac{d\beta}{dt} r_1 \cos \delta_1 - v_r,$$

$$U_x = r_1 \omega + V \cos \alpha_p \cos(a_0 + \beta) \sin \psi,$$

где α_p – угол атаки ротора; v_r – местная индуктивная скорость; a_0 – конструктивный угол конусности НВ; β – угол взмаха ротора, r_1 – расстояние от оси ГШ до элемента, ω – угловая скорость вращения ротора. Аналогично для лопасти 2 (азимут $\psi + \pi$)

$$U_y = V \sin \alpha_p \cos(a_0 - \beta) - V \cos \alpha_p \sin(a_0 - \beta) \cos \psi + \frac{d\beta}{dt} r_2 \cos \delta_2 - v_r,$$

$$U_x = r_2 \omega + V \cos \alpha_p \cos(a_0 - \beta) \sin \psi.$$

Входящие в выражения геометрические величины: $r_{1,2} = \sqrt{r^2 + y_0^2 - 2ry_0 \sin a_0}$; $r_{c1} = r_1 \cos(a_0 + \beta - \delta_1)$ – для лопасти 1 и $r_{c2} = r_2 \cos(a_0 - \beta - \delta_2)$ – для лопасти 2; Здесь углы δ :

$\delta_{1,2} = \arcsin\left(\frac{Y_0 \cos a_0}{r_{1,2}}\right)$. Угол наклона равнодействующей аэродинамических сил $\gamma_i = \Phi - \tau$,

где $\tau = \operatorname{arctg}(C_{xk}/C_{y0})$ - угол качества элемента.

Для определения угла β и скорости $\frac{d\beta}{dt}$ взмаха необходимо уравнение махового движения. Маховое движение ротора несущего винта определяется из условия равновесия моментов в плоскости взмаха относительно горизонтального шарнира [1-5]. Если лопасти абсолютно жесткие и движение в ГШ не ограничено наличием упругих элементов или трением, то на элемент лопасти I действуют, как известно, следующие силы: аэродинамическая F_{a1} ; центробежная $F_{c1} = m_r \omega^2 r_{c1}$ (здесь m_r - элементарная масса); сила тяжести $F_{g1} = m_r g$; сила инерции $F_{i1} = m_r \frac{d\beta}{dt} r_1$. Момент, создаваемый силой тяжести незначителен по сравнению с моментами центробежных, аэродинамических и инерционных сил и в большинстве случаев его можно не учитывать [3]. Момент, создаваемый аэродинамическими силами, равен

$$M_{a1} = \int_0^{BR} F_{a1} r_1 \cos \delta_1 dr.$$

Момент, создаваемый центробежными силами равен

$$M_{c1} = \int_0^R F_{c1} r_{c1} \sin(a_0 + \delta_1) dr = \omega^2 \int_0^R m_r r_{c1}^2 \sin(a_0 + \beta) dr.$$

Момент от инерционных сил равен

$$M_{i1} = \int_0^R F_{i1} r_1 dr = \frac{d\beta}{dt} \int_0^R m_r r_1^2 dr = \frac{d\beta}{dt} J_1,$$

где $J_1 = \int_0^R m_r r_1^2 dr$ - момент инерции лопасти относительно ГШ.

Аналогично для второй лопасти:

$$M_{a2} = \int_0^{BR} F_{a2} r_2 \cos \delta_2 dr;$$

$$M_{c2} = \omega^2 \int_0^R m_r r_{c2}^2 \sin(a_0 - \beta) dr;$$

$$M_{i2} = \frac{d\beta}{dt} J_2.$$

Так как ГШ не имеет упругих элементов, то сумма всех моментов должна быть равна нулю. В результате после преобразований получаем искомое уравнение махового движения ротора НВ на качалке с вертикальным выносом ГШ.

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{J_p} (M_a - M_c),$$

где $J_p = 2J_1$ – момент инерции ротора относительно ГШ, $M_a = M_{a1} - M_{a2}$ – суммарный момент аэродинамических сил; $M_c = M_{c1} - M_{c2}$ – суммарный момент центробежных сил.

По указанной методике был реализован алгоритм численного решения. В проведенных расчетах учитывались нелинейность параметров C_{xa} и C_{ya} по углу атаки и числу M и неравномерность поля индуктивных скоростей (в соответствии с [1]). В качестве примера приведены результаты расчетов одного из режимов полета автожира, имеющего следующие основные характеристики: нагрузка на ометаемую площадь $7,96 \text{ кг/м}^2$; масса лопасти 8 кг ; момент инерции лопасти 430 Н м^2 ; коэффициент заполнения НВ $\sigma = 0,031$; вертикальный вынос ГШ $y_0 = 0,1 \text{ м}$; лопасть – прямоугольная без крутки. Параметры расчетного режима: $\mu = 0,15$, угол установки лопастей 2° . Для упрощения расчетов параметры установившегося режима (α_p , V , ω) определялись по Глауэрту-Локку [2]. Среднее значение индуктивной скорости ротора определялось по импульсной теории НВ [4].

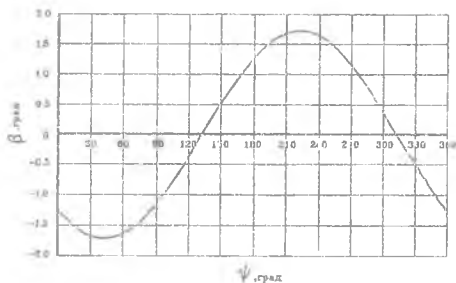


Рис.2

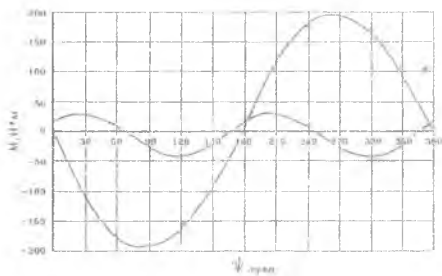


Рис.3

Изменение угла взмаха β по азимуту показано на рис.2; моментов M_y и M_x - на рис.3. Из рисунков видно, что характер махового движения ротора автожира соответствует линеаризованным моделям махового движения лопастей автожиров (например, [2]) и вертолетов (например, [4]), не учитывающим вертикального выноса качалки; текущее азимутальное значение крутящего момент M_x даже на установившихся режимах полета не равно нулю и дважды за оборот меняет свое направление. Момент M_y порождает близкий к симметричному цикл нагружения элементов втулки НВ и, принимая достаточно большие значения, должен учитываться при расчете на прочность указанных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браверман, Вайнтриб. Динамика вертолета. Предельные режимы полета. - М.: Машиностроение, 1988
2. Братухин И.П. Автожиры. Теория и расчет. - М.: ОНТИ НКТП СССР, ГОСМАШМЕТ-ИЗДАТ, 1934.
3. Джонсон У. Теория вертолета. - М.: Мир, 1983.
4. Миль М.Л. и др. Вертолеты. Расчет и проектирование. - М.: Машиностроение, 1966.
5. Пэйи П.Р.. Динамика и аэродинамика вертолета. - М.: Оборонгиз, 1963.