

Управление движением и навигация летательных аппаратов

УДК 681.5.01

Афанасьев В.А., Балоев А.А., Дегтярёв Г.Л., Мещанов А.С.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ЗА СЧЁТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС

Одно из перспективных направлений управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) – это образование аэродинамических сил на корпусе за счёт перемещения центра масс (ЦМ) в продольном и поперечном направлениях относительно связанной системы координат $ox_1y_1z_1$, начало которой расположено в ЦМ, ось ox_1 проходит параллельно оси симметрии, ось oy_1 перпендикулярна оси ox_1 и расположена в вертикальной плоскости симметрии, ось oz_1 дополняет тройку осей до правой системы координат (рисунок 1).

Считая БЛА статически устойчивым: $c_m - c_d < 0$, где $c_m = x_m / l$, $c_d = x_d / l$, x_m - расстояние от законечника до ЦМ, x_d - расстояние от законечника до центра давления (ЦД), l - длина корпуса БЛА, а угол атаки α , образующийся от поперечного смещения ЦМ от продольной оси симметрии вниз на расстоянии Δy , достаточно малым, $C_y = C_y^\alpha \alpha$, величину балансирующего угла атаки α определим из равенства моментов от силы лобового сопротивления $C_x q S$ и подъёмной силы $C_y q S$ (q – скоростной напор, S – площадь миделевого сечения) на соответствующих плечах $\Delta y > 0$ и $c_m - c_d < 0$ по следующей формуле:

$$\alpha = - \frac{C_x \Delta y}{C_y^\alpha (c_m - c_d) l}. \quad (1)$$

С помощью рисунка 1 нетрудно представить случай, когда балансирующее равновесие невозможно, поскольку обе составляющие аэродинамической силы образуют моменты сил одного направления. Такой случай возникает при большом запасе статической устойчивости $|c_m - c_d|$ и малом поперечном смещении ЦМ.

При поперечном смещении ЦМ на величину Δz вправо, как показано на рисунке 2, под действием момента от подъёмной силы Y на этом плече возникает вращение БЛА вокруг продольной оси, проходящей через ЦМ, происходит подобно маятнику до

установления балансировочного равновесия по заданному углу скоростного крена γ_k , как показано на рисунке 3. Однако такой колебательный процесс может продолжаться недопустимо долго. Чтобы сократить время установления балансировочного равновесия по углам скоростного крена, перемещение ЦМ предлагается проводить по закону управления, структура которого показана на рисунке 4.

Рассматривается задача управления БЛА по углам крена для образования балансировочного равновесия на угле скоростного крена γ , благодаря которому образуется боковая составляющая аэродинамической силы, с помощью которой происходит полёт в боковом направлении. Решение задачи управления пространственным полётом БЛА состоит в построении закона управления перемещением ЦМ с помощью специального механизма в поперечном направлении так, чтобы установить заданный угол скоростного крена $\gamma = \gamma_k$, при нулевой угловой скорости $\dot{\gamma}_k = 0$. Это достигается поперечным смещением ЦМ на величину Δz сначала в одном в одном направлении, а после достижения момента переключения t_1 в противоположном направлении (рисунок 4).

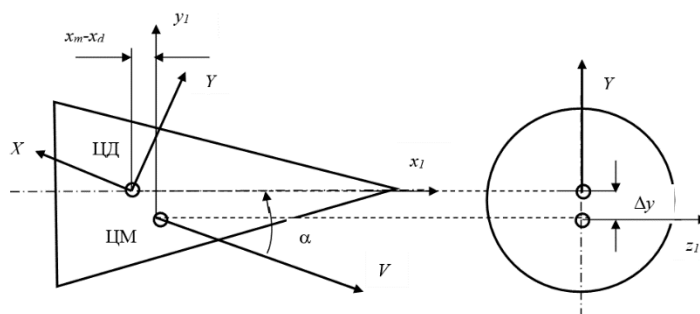


Рисунок 1 – Балансировочное равновесие БЛА на угле атаки α при поперечном смещении ЦМ на величину Δy

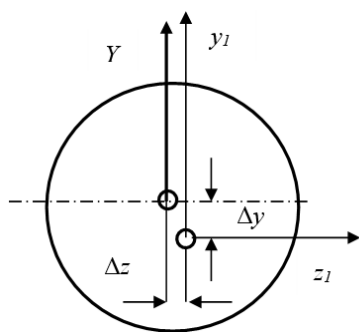


Рисунок 2 – Вращение подъёмной силой с угловой скоростью $\dot{\gamma}$

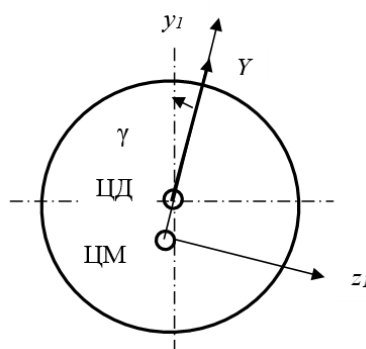


Рисунок 3 – Балансировочное равновесие под углом скоростного крена γ

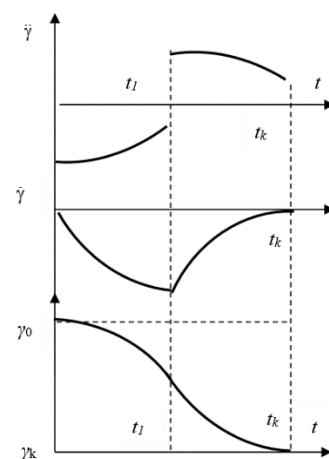


Рисунок 4 – Структура закона управления перемещением ЦМ

Вверху на рисунке 4 показан закон изменения углового ускорения $\ddot{\gamma}$ в результате поперечного смещения ЦМ вправо на величину Δz , а после достижения момента переключения t_l ЦМ смещается на такую же величину влево. Зависимости изменения угловой скорости $\dot{\gamma}$ показаны в середине рисунка 4. Внизу на рисунке 4 показано изменение угла γ от начального значения γ_0 до заданного конечного значения γ_k .

Модель вращения БЛА с учетом малости угла γ на первой части разворота $t \in [t_0, t_1)$ запишем в виде дифференциального уравнения второй степени:

$$\ddot{\gamma} = -C_y q S \Delta z \gamma / I, \quad (2)$$

где I – осевой момент инерции, а знак минус в правой части означает то, что момент силы Y направлен в сторону уменьшения угла γ . Уравнение (2) решается с начальными условиями: $\gamma_0 = \pi$, $\dot{\gamma}_0 = 0$ при замене переменной $\dot{\gamma} = \xi(\gamma)$. Выражение для величины текущей угловой скорости $\dot{\gamma}$ имеет вид:

$$\dot{\gamma} = -\sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z (\pi^2 - \gamma^2)}. \quad (3)$$

К моменту переключения угловая скорость достигает значения:

$$\dot{\gamma}_1 = -\sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z (\pi^2 - \gamma_1^2)}. \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (3) даёт выражение для текущей величины угла γ :

$$\gamma = \pi \cos \left(\sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z t} \right). \quad (5)$$

В момент переключения угол скоростного крена равен:

$$\gamma_1 = \pi \cos \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{\gamma_k}{\pi} \right)^2 \right). \quad (6)$$

Подстановка (5) при $t = t_1$ в (4) даёт зависимость $\dot{\gamma}_1$ от момента времени t_1 :

$$\dot{\gamma}_1 = -\pi \sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z} \sin \left(\sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z t_1} \right). \quad (7)$$

На второй части разворота $t \in [t_1, t_k)$ угловое движение описывается таким же уравнением (2), но со знаком «плюс», означающим, что момент от подъёмной силы направлен на увеличение угла γ . Начальными условиями служат выражения (6) и (7). Решение соответствующего дифференциального уравнения

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} - \frac{C_y q S}{I} \Delta z \gamma = 0 \quad (8)$$

с учётом (6) и (7) определяет конечное значение угловой скорости:

$$\dot{\gamma}_k = -\sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z \left[\gamma_k^2 - \pi^2 \cos \left(2\sqrt{\frac{C_y q S}{I} \Delta z t_1} \right) \right]}. \quad (9)$$

Из условия $\dot{\gamma}_k = 0$ получаем формулу для вычисления момента переключения:

$$t_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{I}{C_y q S \Delta z}} \arccos \left(\frac{\gamma_k}{\pi} \right)^2. \quad (10)$$

Дальнейшее решение даёт выражение для полного времени разворота:

$$t_k = \sqrt{\frac{I}{C_y q S \Delta z}} \left\{ \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{\gamma_k}{\pi} \right)^2 - \ln \left| \frac{\gamma_k}{\gamma_1 + \sqrt{\gamma_1^2 - \gamma_k^2}} \right| \right\}, \quad (11)$$

где угол γ_1 вычисляется по формуле (6), а конечный угол γ_k задаётся исходя из балансировочного равновесия под углом скоростного крена $\gamma_k = \pi - \Delta z / \Delta y$.

Таким образом, получили формулы для $\dot{\gamma}_1$ (4), γ_1 (6), t_1 (10), t_k (11), вычисления по которым полностью определяют закон управления механизмом поперечного смещения ЦМ для получения балансировочного угла скоростного крена γ_k , обеспечивающего пространственное маневрирование БЛА только за счёт перемещения ЦМ. Результаты полезны в проектировании перспективных БЛА.

Публикация выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №15-48-02040.

Библиографический список

1. Федоров В.Б., Козлов А.В. Постановка задач математического моделирования летательного аппарата с изменяемыми массогеометрическими характеристиками. Серия «Машиностроение», выпуск 20. Вестник ЮУрГУ, № 33, 2012. С.165-169.