

УДК 623.746

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИН ЗВЕНЬЕВКРЫЛА ОРНИТОПТЕРА НА ЕГОКИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

С.Ф. Яцун (teormeh@inbox.ru)

Юго-Западный государственный университет, Курск

С.В.Ефимов (scione@yandex.ru)

Воронежский институт ГПС МЧС России

Г.С. Наумов (gregory-XXI@yandex.ru)

Юго-Западный государственный университет, Курск

В данной статье рассматривается орнитоптер – бионический робот с машущими крыльями, имитирующий движения птицы во время полета. Построена математическая модель объекта, представлены результаты в виде графиков. Исследовано влияние длин звеньев крыльев на среднюю скорость робота.

Введение

Имитация или копирование принципов поведения живых организмов позволяет создавать устройства, обладающие уникальными свойствами, нацеленными на повышение уровней комфорта, безопасности и автоматизации жизни современных людей. К устройствам подобного плана относятся орнитоптеры – летающие роботы, имитирующие движения птиц в полете [1]. В данной работе исследуется влияние длин звеньев крыла орнитоптера на его кинематические характеристики.

1. Описание орнитоптера

Рассматриваемый орнитоптер (рис.1) состоит из корпуса 1 и крыльев, состоящих, в свою очередь, из двух звеньев – 2,3 и 4,5. Для дальнейшего изучения движения такого объекта в полете воспользуемся связанной (относительной) системой координат $O'x'y'z'$, начало которой совпадает с центром тяжести корпуса орнитоптера C_1 . Ось $O'x'$ такой системы координат направлена параллельно продольной оси корпуса орнитоптера,

ось $O'y'$ направлена перпендикулярно плоскости крыльев и оси $O'x'$. Плоскость $O'x'y'$ является плоскостью симметрии орнитоопера и делит его на две равные части [2]. Ось $O'z'$ направлена перпендикулярно плоскости симметрии орнитоопера. При всех изменениях положения орнитоопера относительно земной (абсолютной) системы координат $Oxyz$, как линейных, так и угловых, связанная система координат перемещается и вращается вместе с ним.

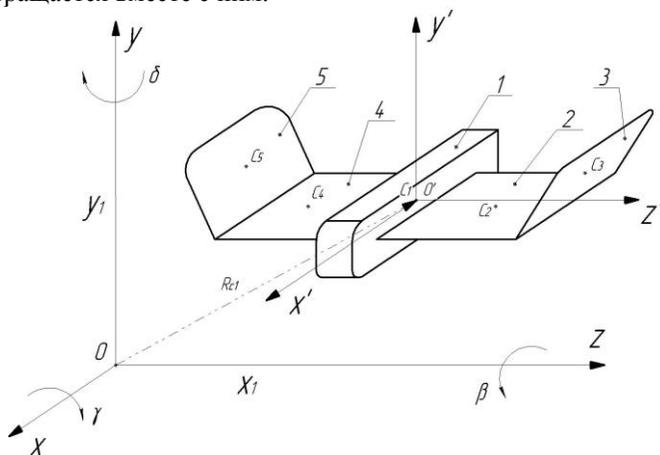


Рис. 1. Расположение орнитоопера в пространстве

В целях упрощения далее будем рассматривать орнитоопера в плоскости Oyz абсолютной системы координат. В точках соединения звеньев установлены приводы, позволяющие звеньям свободно вращаться относительно друг друга. Положение подобной модели орнитоопера на плоскости полностью определяется координатами z_1 и y_1 , а конфигурация звеньев – углами $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$. [3-4].

2. Математическая модель орнитоопера

Покажем силы, действующие на орнитоопера во время полета (Рис.2). Под R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 указаны полные аэродинамические силы, действующие на звено, а под R^1, R^2, R^3, R^4, R^5 – боковые составляющие аэродинамических сил, возникающие за счет обтекания крыла воздушным потоком. В точках соединения звеньев установлены приводы, создающие крутящие моменты $M_{21}, M_{32}, M_{41}, M_{54}$, позволяющие звеньям двигаться относительно друг друга.

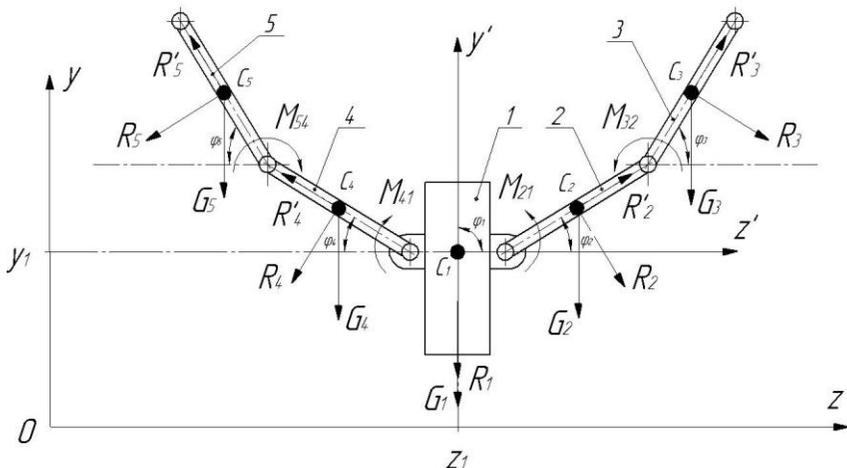


Рис. 2. Математическая модель орнитоопера с учетом действующих сил

В целях упрощения процедуры моделирования движения объекта примем следующие допущения:

1) все звенья летательного аппарата - абсолютно твердые недеформируемые тела;

2) каждое из звеньев представляет собой стержень длиной l_i и массой m_i , сосредоточенной в центре симметрии звена C_i .

3) величины боковых составляющих аэродинамических сил $R'_1, R'_2, R'_3, R'_4, R'_5$ настолько малы, что ими можно пренебречь.

Приведенные полные аэродинамические силы R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 сосредоточены в центрах тяжести эпюр распределенных по крылу аэродинамических сил, и рассчитываются как [2]:

$$R_i = C_r \cdot \frac{\rho \cdot V_i^2}{2} \cdot S_i \cdot \text{sign}|V_i|,$$

где ρ – массовая плотность воздуха;

V_i – скорость точки приложения приведенной силы R_i относительно воздуха, зависящая от обобщенных координат;

S_i – эффективная площадь звена крыла, зависящая от угловых перемещений;

C_r – безразмерный коэффициент полной аэродинамической силы.

Движение орнитоопера описывается системой из семи дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
& \ddot{\varphi}_1(J_1 + \frac{1}{4}m_2l_1^2 + \frac{1}{4}m_3l_1^2) + \ddot{\varphi}_2(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\frac{l_1l_2}{2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \ddot{\varphi}_3m_3\frac{l_1l_3}{4}\cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \\
& + \ddot{y}_{C1}(m_2 + m_3)\frac{l_1}{2}\cos\varphi_1 - \ddot{z}_{C1}(m_2 + m_3)\frac{l_1}{2}\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2^2(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\frac{l_1l_2}{2}\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \dot{\varphi}_3^2m_3\frac{l_1l_3}{4}\sin(\varphi_1 - \varphi_3) = -R_3 \cdot \frac{l_3}{2} - R_2 \cdot \frac{l_2}{2} - R_1(\cos(\varphi_1) + \sin(\varphi_1)) - \\
& - m_1g - m_2g\frac{l_2}{3}\cos\varphi_2 - m_3g\frac{l_3}{2}\cos\varphi_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{\varphi}_2(J_2 + \frac{1}{4}m_2l_2^2 + m_3l_2^2) + \ddot{\varphi}_1(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\frac{l_1l_2}{2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \ddot{\varphi}_3m_3\frac{l_2l_3}{2}\cos(\varphi_2 - \varphi_3) + \\
& + \ddot{y}_{C1}(m_2 + 2m_3)\frac{l_2}{2}\cos\varphi_2 - \ddot{z}_{C1}(m_2 + 2m_3)\frac{l_2}{2}\sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1^2(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\frac{l_1l_2}{2}\sin(\varphi_2 - \varphi_1) + \\
& + \dot{\varphi}_3^2m_3\frac{l_2l_3}{2}\sin(\varphi_2 - \varphi_3) = M_{21} - R_3 \cdot \frac{l_3}{2} - R_2 \cdot \frac{l_2}{2} - m_2g\frac{l_2}{2}\cos\varphi_2 - m_3g\frac{l_3}{2}\cos\varphi_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{\varphi}_3(J_3 + \frac{1}{4}m_3l_3^2) + \ddot{\varphi}_2\frac{l_2l_3}{2}m_3\cos(\varphi_2 - \varphi_3) + \ddot{\varphi}_1m_3\frac{l_1l_3}{4}\cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \ddot{y}_{C1}m_3\frac{l_3}{2}\cos\varphi_3 - \\
& - \ddot{z}_{C1}m_3\frac{l_3}{2}\sin\varphi_3 + \dot{\varphi}_1^2m_3\frac{l_1l_3}{4}\sin(\varphi_3 - \varphi_1) + \dot{\varphi}_2^2m_3\frac{l_2l_3}{2}\sin(\varphi_3 - \varphi_2) = M_{32} - R_3 \cdot \frac{l_3}{2} - \\
& - m_3g \cdot \frac{l_3}{2}\cos\varphi_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{\varphi}_4(J_4 + \frac{1}{4}m_4l_4^2 + m_5l_4^2) + \ddot{\varphi}_1(\frac{1}{2}m_4 + m_5)\frac{l_1l_4}{2}\cos(\varphi_1 - \varphi_4) + \ddot{\varphi}_5m_5\frac{l_4l_5}{2}\cos(\varphi_4 - \varphi_5) + \\
& + \ddot{y}_{C1}(m_4 + 2m_5)\frac{l_4}{2}\cos\varphi_4 - \ddot{z}_{C1}(m_4 + 2m_5)\frac{l_4}{2}\sin\varphi_4 + \dot{\varphi}_1^2(\frac{1}{2}m_4 + m_5)\frac{l_1l_4}{2}\sin(\varphi_4 - \varphi_1) + \\
& + \dot{\varphi}_5^2m_5\frac{l_4l_5}{2}\sin(\varphi_4 - \varphi_5) = M_{41} + R_5 \cdot \frac{l_5}{2} + R_4 \cdot \frac{l_4}{2} - m_5g\frac{l_5}{2}\cos\varphi_5 - m_4g\frac{l_4}{2}\cos\varphi_4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{\varphi}_5(J_5 + \frac{1}{4}m_5l_5^2) + \ddot{\varphi}_4\frac{l_4l_5}{2}m_5\cos(\varphi_4 - \varphi_5) + \ddot{\varphi}_1m_5\frac{l_1l_5}{4}\cos(\varphi_1 - \varphi_5) + \ddot{y}_{C1}m_5\frac{l_5}{2}\cos\varphi_5 - \\
& - \ddot{z}_{C1}m_5\frac{l_5}{2}\sin\varphi_5 + \dot{\varphi}_1^2m_5\frac{l_1l_5}{4}\sin(\varphi_5 - \varphi_1) + \dot{\varphi}_4^2m_5\frac{l_4l_5}{2}\sin(\varphi_5 - \varphi_4) = M_{54} - R_5 \cdot \frac{l_5}{2} - \\
& - m_5g \cdot \frac{l_5}{2}\cos\varphi_5
\end{aligned}$$

$$\ddot{z}_{C1}(m_1 + m_2 + m_3) - \ddot{\varphi}_1 \frac{l_1}{2} \sin \varphi_1 (m_2 + m_3) - \ddot{\varphi}_2 \frac{l_2}{2} \sin \varphi_2 (m_2 + 2m_3) - \ddot{\varphi}_3 m_3 \frac{l_3}{2} \sin \varphi_3 - \\ - \dot{\varphi}_1^2 (m_2 + m_3) \frac{l_1}{2} \cos \varphi_1 - \dot{\varphi}_2^2 (m_2 + 2m_3) \frac{l_2}{2} \cos \varphi_2 - \dot{\varphi}_3^2 m_3 \frac{l_3}{2} \cos \varphi_3 = -R_1 \cos \varphi_1 + \\ + R_2 \sin \varphi_2 + R_3 \sin \varphi_3 + R_4 \sin \varphi_4 + R_5 \sin \varphi_5$$

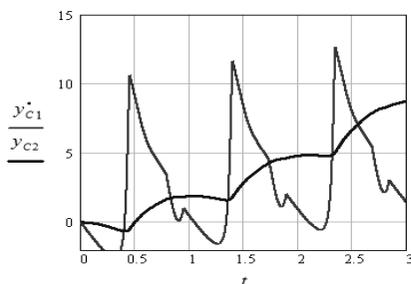
3. Исследование влияния длин звеньев на среднюю скорость движения

Разработанная математическая модель позволила провести исследование влияния длин звеньев крыла орнитоопера на среднюю скорость движения корпуса. Моделирование проводилось для робота массой 1 кг. Массовая плотность воздуха $\rho=1.2 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$, коэффициент аэродинамической силы $C_R=0.2$.

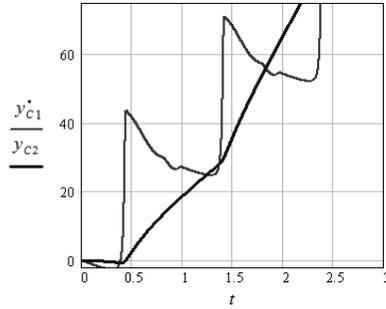
Характер движения робота определяется многими параметрами – длиной звеньев, амплитудой управляющих моментов, диапазоном углов, в котором осуществляется поворот звеньев. Выберем критерий оценки степени влияния каждого из этих параметров – этим критерием будет средняя скорость V_{C1}^{cp} корпуса робота за два полных цикла движения.

Предварительный анализ показал, что изменение длины первого звена на скорость робота никакого влияния не оказывает, так как моделируемое движение - синхронное, и это звено не имеет углового перемещения.

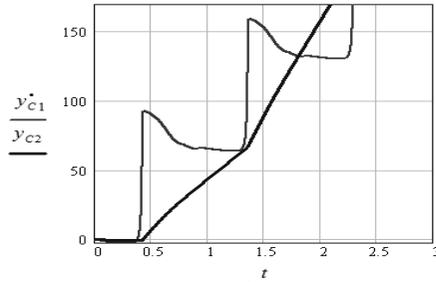
Будем изменять длину второго звена l_2 , и оценивать V_{C1}^{cp} .



а) при $l_2 = 1 \text{ м}$



б) при $l_2 = 2$ м

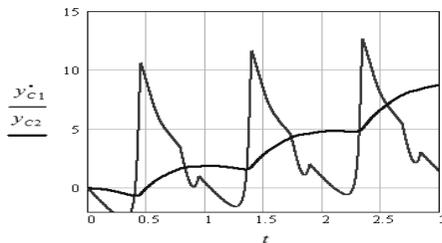


с) при $l_2 = 3$ м

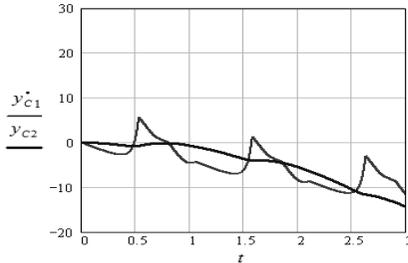
Рис. 3. Графики перемещения и скорости центра масс орнитоптера при изменяемой длине второго звена крыла

Видно, что увеличение длины второго звена в 2 раза ведет к увеличению средней скорости взлета орнитоптера почти в 4 раза, в 3 раза – к увеличению средней скорости почти в 9 раз. Зависимость между этими двумя параметрами прямо пропорциональная, причем явно нелинейная, возможно, носящая квадратичный характер.

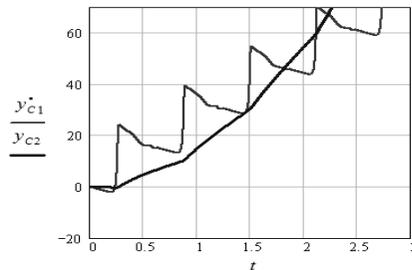
Исследуем влияние длины второго звена l_3 , на среднюю скорость движения V_{c1}^{op} .



а) при $l_3 = 1$ м



б) при $l_3 = 1,5$ м



в) при $l_3 = 0,5$ м

Рис. 4. Графики перемещения и скорости центра масс орнитоопера при изменяемой длине третьего звена крыла

На графиках видно, что наблюдается снижение средней скорости V_{C1}^{cp} при увеличении длины третьего звена, и смена режима «взлет» на режим «посадка» при $l_3 > 1,35$ м. Зависимость между этими двумя параметрами обратно пропорциональная.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для достижения большей эффективности полета длины звеньев 2,3 должны быть разными.

Заключение

В работе рассмотрен орнитооптер, крылья которого состоят из двух звеньев, построена его математическая модель. Была получена система из семи дифференциальных уравнений, описывающая движение многозвенной системы в воздушной среде.

Моделирование движения выполнено для типа полета, при котором корпус робота совершает горизонтальный полет. Получены зависимости

соответствующих обобщенных координат от времени, представлены результаты численного моделирования. Исследовано влияние длин звеньев крыла на среднюю скорость движения орнитоопера.

Список литературы

[Вотяков и др., 1975] Вотяков А.А., Каюнов Н.Т. Аэродинамика и динамика полета самолета – уч. пос. – М.: "Издательство ДОСААФ", 1975 – 295 с.

[Нашукевич и др., 1968] Нашукевич А.В., Неволин Ф.А., Немировский Ф.А. Аэродинамика самолета – М.: "Воениздат", 1968.

[Яцун и др., 2013] Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Рублев С.Б., Наумов Г.С. Трехзвенный ползающий робот как средство передвижения // Прогресс транспортных средств и систем - 2013: материалы Международной научно-практической конференции / ВолгГТУ – Волгоград, 2013. –Ч1.-С. 293–294.

[Локтионова и др., 2013] Локтионова О.Г., Яцун С.Ф., Рублев С.Б., Волкова Л.Ю., Наумов Г.С. Моделирование движения трехзвенного робота с управляемыми силами трения по абсолютно гладкой горизонтальной поверхности // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 91(07). С. 41.