

УДК 004.942

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ЗАВИСАНИЯ ЛЕТАЮЩЕГО ПЯТИЗВЕННОГО РОБОТА

Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Ворочаева Л.Ю., Ефимов С.В.

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: teormeh@inbox.ru

Данная работа посвящена исследованию режима зависания на некоторой высоте пятизвенового робота с крыльями, которые при совершении взмахов складываются и раскладываются таким образом, что их движения аналогичны взмахам крыльев чайки. Движение устройства происходит в вертикальной плоскости, перпендикулярной продольной оси робота, все звенья объекта образуют цепочку при помощи цилиндрических шарниров с параллельными осями. Разработана математическая модель полета орнитоопера, полет представлен в виде последовательности этапов, каждый из них отличается направлениями движения звеньев крыльев, переключение между этапами происходит при достижении углами поворота звеньев крыльев определенных значений, предложена система управления его приводами, обеспечивающая реализацию требуемых законов движений крыльев. В результате численного моделирования построены диаграммы режимов движения робота: взлет, зависание и посадка, установлено влияние на размах колебаний корпуса и значение высоты, относительно которой эти колебания происходят, амплитуды и частоты взмахов крыльев, а также их площади и соотношения длины и ширины.

Ключевые слова: орнитооптер, пятизвеновый робот, летающий робот, крылья, аэродинамические силы, этапы движения, диаграммы режимов, взлет, посадка, зависание

STUDY OF THE HOVERING MODE OF FLYING FIVE-LINK ROBOT

Yatsun S.F., Loktionova O.G., Vorochaeva L.Yu., Efimov S.V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Southwest State University», Kursk, e-mail: teormeh@inbox.ru

This work is devoted to study of the mode of hover at a certain height of a five-link robot with wings that when making flap to fold and unfold in such a way that their movement is similar to the flapping of the wings of a gull. The movement of the device occurs in the vertical plane perpendicular to the longitudinal axis of the robot, all links of an object form a chain by means of cylindrical hinges with parallel axes. The mathematical model of ornithopter's is developed, flight is presented in a sequence of stages, each of these different directions of movement of links of the wings, switching between stages occurs when the angles of rotation of links of the wings of certain values, the control system of robot's drives is proposed, this system ensuring the realization of the required laws of the movements of the wings. In the numerical simulation of the diagram of the movement modes of the robot: takeoff, hovering and landing are obtained, the effect on the amplitude fluctuation of the body and the height value, relative to which these fluctuations occur of amplitude and frequency fluctuations of the angles of the links of the wings, and also their square with the same area of the wings to influence.

Keywords: ornithopter, five-link robot, flying robot, wings, aerodynamic force, motion stages, diagram of modes, takeoff, landing, hovering

В настоящее время активно развивается одно из направлений робототехники – роботы, построенные на биологических принципах, движение и конструкция которых приближены к некоторому биологическому объекту [4, 7, 8]. К таким роботам относятся ползающие гусеницеподобные, змееподобные, червеподобные, шагающие антропоморфные, плавающие роботы-рыбы, летающие роботы-насекомые, роботы-птицы, прыгающие роботы-кузнечики, роботы-кенгуру и т.д. [5, 6, 9]. По сравнению с другими типами роботов устройства, построенные на принципах бионики, копируют наиболее важные особенности биологического оригинала, что повышает их маневренность, проходимость, управляемость движения, расширяет области применения [1–3].

В работе рассматривается летающий робот, полет которого обеспечивают машу-

щие крылья, каждое из которых состоит из двух частей, складывающихся и раскладывающихся друг относительно друга. Конструкция объекта аналогична устройству птицы, за счет взмахов крыльев изменяется их площадь и силы аэродинамического сопротивления, действующие на них со стороны окружающей среды, что позволяет им имитировать полет птиц.

Описание робота, расчетная схема

На рис. 1 приведена расчетная схема летающего робота-орнитоопера, полет которого происходит в вертикальной плоскости Oxz вдоль оси Oz (вверх/вниз). Перемещение устройства вдоль своей продольной оси (от нас, на нас) либо отсутствует, либо происходит равномерно. Смещения объекта влево/вправо не наблюдаются. Робот состоит из пяти звеньев 1–5, центральное 3 из которых является корпусом, а боковые 1, 2

и 4, 5 попарно образуют два крыла. Шарниры между звеньями цилиндрические, оси их вращения перпендикулярны плоскости Oxz . При такой конструкции звенья крыльев могут складываться/раскладываться как относительно корпуса, так и друг относительно друга.

При разработке математической модели будем считать, что в рассматриваемой вертикальной плоскости звенья, являющиеся крыльями, имеют вид стержней, а корпус – форму прямоугольника. Центры масс звеньев C_i совпадают с центрами их симметрии. Звенья крыльев во время полета движутся симметрично относительно вертикальной оси, являющейся осью симметрии устройства.

Полет робота происходит за счет изменения площади крыльев при их взмахах вверх и вниз. При движении крыльев вверх их звенья так складываются друг относительно друга и относительно корпуса, что проекция их площади, перпендикулярная вертикальной оси, существенно уменьшается, что приводит к уменьшению аэродинамических сил, действующих на крылья со стороны окружающей среды. Это позволяет крылу с меньшим сопротивлением подниматься вверх. При взмахе крыльев вниз их звенья занимают положение, противоположное ранее рассмотренному, т.е. крылья максимально раскладываются, тем самым увеличивая площадь перпендикулярно оси Oz , значит, и аэродинамические силы, за счет чего происходит парение устройства.

Математическая модель полета орнитооптера

Положение каждого звена пятизвенного робота на вертикальной плоскости определяется тремя координатами: проекциями x_{C_i} , y_{C_i} положения центра масс на координатные оси и углом φ_i поворота звена против часо-

вой стрелки относительно оси Ox . Предложенная расчетная схема робота накладывает на его звенья связи $r_{Ci=1,2,4,5} = f(r_{C3})$:

$$\vec{r}_{C2} = \vec{r}_{C3} + \vec{r}_{C3O3} + \vec{r}_{O3C2},$$

$$\vec{r}_{C4} = \vec{r}_{C3} + \vec{r}_{C3O4} + \vec{r}_{O4C4}, \quad (1)$$

$$\vec{r}_{C1} = \vec{r}_{C3} + \vec{r}_{C3O3} + \vec{r}_{O3O2} + \vec{r}_{O2C1},$$

$$\vec{r}_{C5} = \vec{r}_{C3} + \vec{r}_{C3O4} + \vec{r}_{O4O5} + \vec{r}_{O5C5}. \quad (2)$$

С учетом этого вектор обобщенных координат имеет следующий вид: в него входят проекции x_{C3} , y_{C3} положения центра масс корпуса на оси Ox и Oz , а также углы поворота всех звеньев системы φ_i .

$$\bar{q} = (x_{C3} \quad z_{C3} \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5)^T. \quad (3)$$

В связи с тем, что звенья 1 и 5, 2 и 4 крыльев робота во время его полета движутся с одинаковыми частотами и амплитудами, но в противоположных направлениях, справедливы соотношения: $\varphi_1 = -\varphi_5$, $\varphi_2 = -\varphi_4$. Причем такие колебания звеньев крыльев робота приводят к тому, что вращение корпуса во время полета и его смещения относительно оси Ox не будет происходить, т.е. $\varphi_3 = 0$, $x_{C3} = \text{const}$. Это означает, что число обобщенных координат сокращается до трех:

$$\bar{q} = (z_{C3} \quad \varphi_4 \quad \varphi_5)^T. \quad (4)$$

Движение орнитооптера в вертикальной плоскости происходит под действием на его звенья следующих моментов и сил: сил тяжести, приложенных к центрам масс всех звеньев и направленных вертикально вниз, моментов, создаваемых приводами и обеспечивающих сложение/разложение крыльев, а также аэродинамических сил, приложенных к центрам масс звеньев и направленных перпендикулярно векторам скоростей указанных точек.

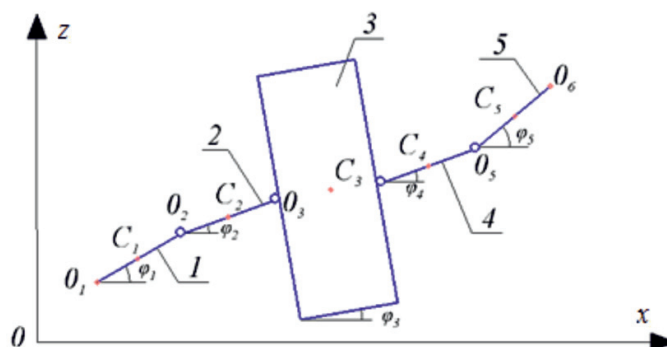


Рис. 1. Расчетная схема орнитооптера в плоскости Oxz

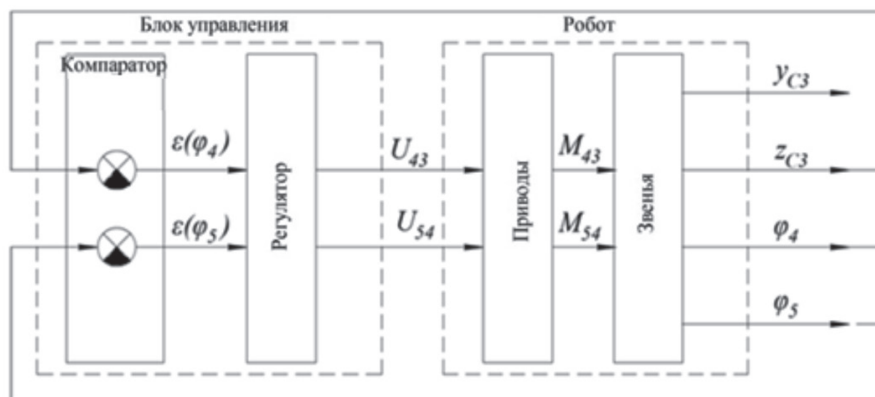


Рис. 2. Структурная схема системы управления орнитоптером

Аэродинамические силы вычисляются по формуле

$$R_{i=1-5} = \frac{C_R \rho S_i}{2} \dot{r}_{Ci}^2 |r_{Ci}| \quad (5)$$

где C_R – безразмерный коэффициент полной аэродинамической силы, S_i – эффективная площадь звена, ρ – массовая плотность воздуха, $\dot{r}_{Ci}$ – скорость точки C_i относительно воздуха.

Для записи системы дифференциальных уравнений, описывающих движения звеньев робота, будем использовать матричную форму записи

$$A\ddot{q} + B\dot{q} = F, \quad (6)$$

где A , B – матрицы коэффициентов, D – диагональная матрица обобщенных скоростей, F – матрица обобщенных сил.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Система управления движением орнитоптера

Структурная схема системы управления приведена на рис. 2. Она включает в себя блок управления, состоящий из компаратора и регулятора, и летающего робота, состоящего из приводов и звеньев. На вход компаратора поступают фактические значения углов поворота звеньев 4 и 5 крыльев, где они сравниваются с требуемыми. Ошибки рассогласования сигналов передаются на

регулятор, формирующий напряжения, подаваемые на двигатели орнитоптера, на выходе двигателей генерируются моменты, за счет которых формируются фактические углы поворота звеньев 4 и 5 крыльев, а также координаты центра масс корпуса.

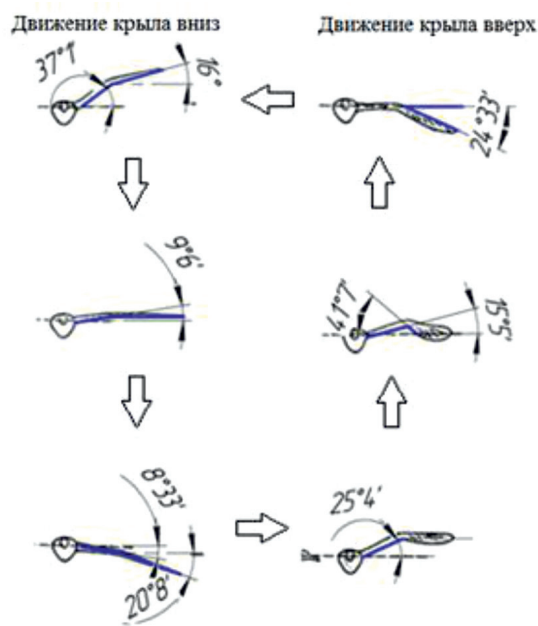


Рис. 3. Движения крыльев чайки и орнитоптера при взмахе вверх и вниз

Для обеспечения полета робота система управления должна генерировать требуемые законы изменения углов поворота звеньев 4 и 5 крыльев. В связи с тем, что исследуемый робот является бионическим, то законы движения крыльев относительно корпуса должны быть близки к аналогичным у птиц. В качестве одного из возмож-

ных вариантов в работе рассматриваются положения крыльев чайки при взмахе ими вверх и вниз (рис. 3), которые реализуются системой управления роботом [6–8]. Отметим, что амплитуды взмахов звеньев крыла, а также частота взмахов являются управляемыми параметрами.

Исследование режима зависания

Ниже представлены результаты численного моделирования движения орнитооптера в одном из режимов его движения – зависания на некоторой высоте (рис. 4, а).

Этот режим характеризуется колебаниями центра масс корпуса робота с размахом z_m относительно некоторого положения равновесия z_{sr} . В качестве параметров, влияющих на движение робота, рассматриваются амплитуда φ_0 и частота ω взмахов крыльев, а также площадь звеньев крыльев и их геометрическая форма.

Положим, что крылья имеют форму пластин длинами l_i , ширинами b_i , толщина которых близка к нулю $h_i \rightarrow 0$, а в вертикальной плоскости Oxz пластины вырождаются в стержни длинами l_i . Площадь каждого звена крыла равна

$$S_i = l_i b_i, \quad (8)$$

суммарная площадь звеньев крыльев вычисляется по формуле

$$S = \sum_{i=1-4} S_i. \quad (9)$$

Примем допущение, что длины и ширины всех звеньев крыльев равны между собой: $l_1 = l_2 = l_3 = l_4$, $b_1 = b_2 = b_3 = b_4$. Одна и та же площадь крыльев может быть получена тремя разными комбинациями соотношений длины и ширины каждого звена крыла:

1. $l_i > b_i$.
2. $l_i = b_i$.
3. $l_i < b_i$.

На рис. 4, б приведены графики кривых, соответствующих режиму зависания робота, при различной форме крыльев и одинаковой суммарной площади. Ниже построенных кривых находится режим посадки устройства, а выше – режим взлета. По кривым видно, что для обеспечения перехода из режима посадки в режим взлета при меньших амплитудах взмаха крыльев при одних и тех же частотах их колебаний длина каждого звена крыла должна быть больше его ширины, а для реализации того же перехода с наибольшими амплитудами колебаний крыльев, наоборот, ширина каждого звена должна быть больше его длины. С увеличением площади крыльев амплитуды их колебаний снижаются для обеспечения перехода из режима посадки в режим взлета при одной и той же частоте ω (рис. 4, в).

Режим зависания робота характеризуется размахом колебаний корпуса z_m относительно некоторой высоты (положения равновесия) z_{sr} . По кривым рис. 5, а видно, что размах колебаний корпуса плавно убывает с увеличением частоты взмахов крыльев, причем при одной и той же площади наибольший размах колебаний наблюдается при форме звеньев крыльев, когда длина больше ширины, а наименьший – когда ширина больше длины. Кривая размаха при квадратных крыльях находится между двумя вышеуказанными. По мере увеличения площади крыльев размах колебаний корпуса возрастает при малых частотах взмахов крыльев и остается неизменным при больших (рис. 5, б).

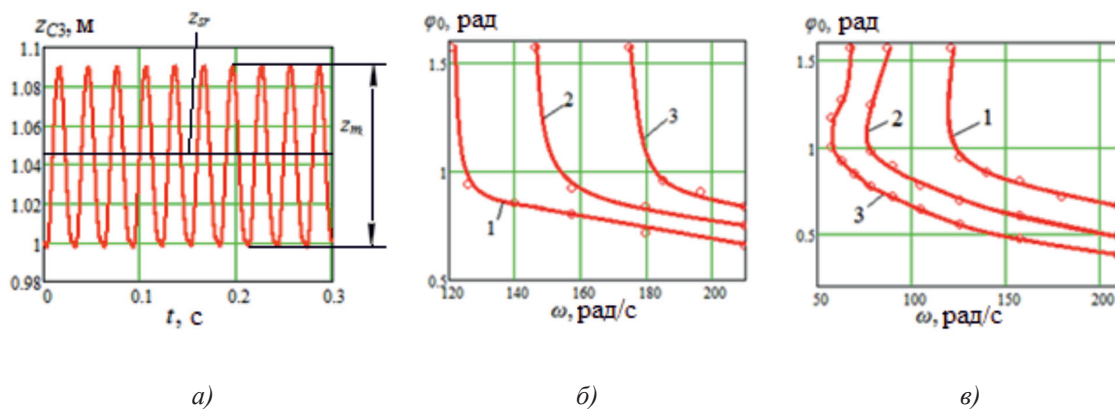
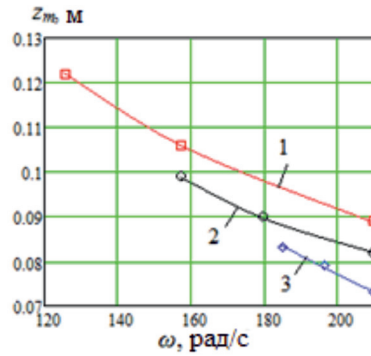
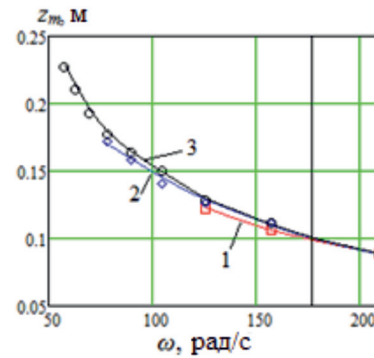


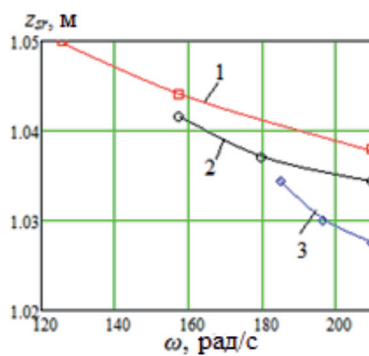
Рис. 4. а – график зависимости $z_{C3}(t)$ в режиме зависания, б, в – графики зависимостей $\varphi_0(\omega)$, соответствующие режиму зависания: б – при $S = 0,06 \text{ м}^2$: 1 – $l_i > b_i$, 2 – $l_i = b_i$, 3 – $l_i < b_i$, в – при $b = 0,1 \text{ м}$, 1 – $S = 0,06 \text{ м}^2$; 2 – $S = 0,08 \text{ м}^2$; 3 – $S = 0,1 \text{ м}^2$



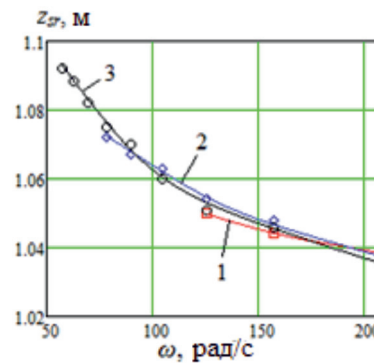
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. а, б – графики зависимостей $z(\omega)$, в, г – графики зависимостей $z_{sr}(\omega)$:
а – $S = 0,06 \text{ м}^2$, 1 – $l = 0,15 \text{ м}$, $b = 0,1 \text{ м}$; 2 – $l = b = 0,123$; 3 – $l = 0,1 \text{ м}$, $b = 0,15 \text{ м}$;
б – $b = 0,1 \text{ м}$, 1 – $S = 0,06 \text{ м}^2$; 2 – $S = 0,08 \text{ м}^2$; 3 – $S = 0,1 \text{ м}^2$

Значение высоты, относительно которого происходят колебания корпуса, изменяется с увеличением частоты взмахов крыльев аналогично размаху, что видно по графикам рис. 5, в. Изменение высоты z_{sr} от площади крыльев и частоты их взмахов несколько другое: при малых частотах z_{sr} тем больше, чем больше площадь крыльев, с ростом частоты наоборот, z_{sr} тем меньше, чем больше площадь крыльев (рис. 5, г).

Заключение

В работе рассмотрен один из режимов движения летающего робота – зависание на некоторой высоте. Робот представляет собой пятизвенный механизм, все звенья которого соединены цилиндрическими шарнирами, движение крыльев во время полета аналогично взмахам крыльев птиц, каждое крыло робота образовано двумя звеньями, складывающимися и раскладывающимися во время каждого взмаха. В результате проведенно-

го численного моделирования установлено, что режим зависания является переходным между режимами взлета и посадки. Выявлено, что для перехода из режима посадки в режим взлета при меньших амплитудах взмахов крыльев при одной и той же частоте колебаний необходимо использовать крылья с наибольшей из возможных площадей, причем геометрически их длина должна быть как можно больше их ширины. Также определено влияние на размах колебаний корпуса по высоте и положение равновесия, относительно которого эти колебания происходят, площади крыльев и их геометрических размеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00787, РНФ в рамках научного проекта № 14-39-00008.

Список литературы

1. Ефимов С.В., Коршунов Е.В., Поляков Р.Ю., Тарасов О.С., Яцун С.Ф. Экспериментальные исследования

параметров машущего крыла для прыгающе-летающего робота // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–2. – С. 252–256.

2. Ефимов С.В., Попов Н.И., Поляков Р.Ю. Исследование движения пятизвенного орнитоптера при взлете // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 1. – С. 195–198.

3. Поляков Р.Ю., Ефимов С.В., Праслов Р.И. Изучение движения взлета летающего робота с машущим крылом // Вестник Воронежского института МВД России. – 2014. – № 3. – С. 48–54.

4. Brooks A.N. Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur // AIAA. – 1985. – P. 85–1446.

5. Czaparo E., Ingram B. A micro-sized ornithopter wing design // 41st aerospace sciences meeting and exhibit. – 2003. – P. 1–9.

6. DeLaurier J.D. An aerodynamic model for flapping wing flight // The aeronautical journal of the royal aeronautical society. – 1993. – P. 153–162.

7. DeLaurier J. D. An ornithopter wing design // Canadian aeronautics and space journal. – 1994. – Vol. 40. – № 1. – P. 10–18.

8. DeLaurier J.D. The development of an efficient ornithopter wing // The aeronautical journal of the royal aeronautical society. – 1993. – P. 153–161.

9. Larijani R.F. A non-linear aeroelastic model for the study of flapping-wing flight // University of Toronto institute for aerospace studies. – 2000. – P. 153.

References

1. Efimov S.V., Korshunov E.V., Poljakov R.Ju., Tarasov O.S., Jacun S.F. Jeksperimentalnye issledovanija parametrov mashushhego kryla dlja prygajushhe-letajushhego robota // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 11–2. pp. 252–256.

2. Efimov S.V., Popov N.I., Poljakov R.Ju. Issledovanie dvizhenija pjatizvennogo ornitoptera pri vzlete // Problemy obespechenija bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. 2014. no. 1. pp. 195–198.

3. Poljakov R.Ju., Efimov S.V., Praslov R.I. Izuchenie dvizhenija vzleta letajushhego robota s mashushhim krylom // Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2014. no. 3. pp. 48–54.

4. Brooks A.N. Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur // AIAA. 1985. pp. 85–1446.

5. Czaparo E., Ingram B. A micro-sized ornithopter wing design // 41st aerospace sciences meeting and exhibit. 2003. pp. 1–9.

6. DeLaurier J.D. An aerodynamic model for flapping wing flight // The aeronautical journal of the royal aeronautical society. 1993. pp. 153–162.

7. DeLaurier J. D. An ornithopter wing design // Canadian aeronautics and space journal. 1994. Vol. 40. no. 1. pp. 10–18.

8. DeLaurier J.D. The development of an efficient ornithopter wing // The aeronautical journal of the royal aeronautical society. 1993. pp. 153–161.

9. Larijani R.F. A non-linear aeroelastic model for the study of flapping-wing flight // University of Toronto institute for aerospace studies. 2000. pp. 153.