

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-93

doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-53-63

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ МАШУЩЕГО КРЫЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С СОПРОТИВЛЯЮЩЕЙСЯ СРЕДОЙ

Сергей Венегдитович Ефимов¹, Оксана Викторовна Емельянова^{2✉},
Сергей Федорович Яцун³

^{1,2,3}ФГОУ ВО "Юго-Западный государственный университет", 305040, Курск, ул.50 лет Октября, 94, Курск, Россия

¹e-mail: Scione@yandex.ru; 0000-0002-8168-5251

²e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru; 0000-0002-6067-3114

³e-mail: teormeh@inbox.ru; 0000-0002-7420-0772

Аннотация

Цель исследования. В статье рассматриваются вопросы моделирования биологически инспирированного движения беспилотной летающей платформы (БЛП) оснащенной машущими крыльями. Особое внимание уделено моделированию взаимодействия машущего крыла с сопротивляющейся воздушной средой. Поэтому, целью исследования является математическое моделирование приведенной силы, возникающей при взаимодействии крыла с сопротивляющейся средой.

Задача, решению которой посвящена статья. Для выполнения поставленной цели необходимо провести математическое моделирование вращательного движения крыла БЛП с учетом кинематических и динамических особенностей двухкоординатного вращения для различных законов изменения углов поворота крыла относительно продольной и поперечной осей.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи использовались методы классической механики, теории устойчивости движения, оптимального управления, теории наблюдений, параметрической оптимизации.

Новизна работы заключается в алгоритмах формирования законов изменения углов поворота крыльев относительно продольной и поперечной осей, представленных в виде гладких функций. Предложен метод определения приведенной силы, возникающей при движении крыла. Получены за-

висимости проекций приведенной силы взаимодействия крыла с воздухом, обеспечивающие создание подъемной и тяговой сил. Эти силы позволяют БЛП перемещаться в пространстве по заданной траектории.

Результаты исследования. Проведено моделирование режимов движения машущего крыла и получены зависимости мгновенных значений проекций сил, создаваемых крылом при движении. Эти силы позволяют БЛП перемещаться в пространстве по заданной траектории. Показано, что управление движением БЛП осуществляется за счет изменения частоты и амплитуды колебаний крыла, а также изменением угла наклона нейтральной линии относительно которой происходит поворот крыла.

Выводы: предложена модель приведенной силы, возникающей при движении машущего крыла. Построены графики зависимостей эффективной площади крыла (площади миделева сечения) для различных параметров законов изменения углов поворота от времени. Проведено моделирование машущего движения крыльев летательного аппарата. Определена область параметров, при которых проекции перемещения крыла создают горизонтальную F_{1x} , и подъемную F_{1z} силы при различных значениях проекций площадей S_{1x} , S_{1y} , S_{1z} .

Ключевые слова: машущее крыло, подъемная сила, угол поворота крыла, эффективная площадь крыла.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта «Реализация программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Ссылка для цитирования:

Ефимов С.В. Математическое моделирование движений машущего крыла при взаимодействии с сопротивляющейся средой / С. В. Ефимов, О. В. Емельянова, С. Ф. Яцун // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 3. – С. 53–63. doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-53-63.

MATHEMATICAL MODELING OF FLAPPING WING MOVEMENTS WHEN INTERACTING WITH A RESISTING MEDIUM

Sergey Venegditovich Efimov¹, Oksana Viktorovna Emelyanova^{2✉},
Sergey Fedorovich Jatsun³

^{1,2,3}The Southwest State University, 94, 50-let Oktyabrya Str., Kursk, 305040, Russia

¹ e-mail: Sclione@yandex.ru; 0000-0002-8168-5251

² e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru; 0000-0002-6067-3114

³ e-mail: teormeh@inbox.ru; 0000-0002-7420-0772

Abstract

The work objective. The paper deals with the issues of modeling biologically inspired movement of an unmanned flying platform (UFP) equipped with flapping wings. Special attention is paid to modeling the interaction of a flapping wing with a resisting air medium. Therefore, the study aim is mathematical modeling of the force which occurs when the wings interact with the resisting medium.

The problem to which the paper is devoted. To solve the problem is to make the mathematical model of the rotational motion of drone wing taking into account kinematic and dynamic features of two-coordinate rotation for various angle changing relative to the longitudinal and transverse axes.

Research methods. Methods of classical mechanics, theory of motion stability, optimal control, observations, parametric optimization were used to solve the problem.

The novelty of the work lies in the algorithms for changing the angles of wings rotation relative to the longitudinal and transverse axes, presented as smooth functions. A method for defining the reduced force arising during the wing movement is proposed. The dependences of the reduced force of wing-air interac-

tion are obtained which provide the development of lifting and traction forces. These forces allow the drone to move in space along a given trajectory.

The study results. The modes of flapping wing motion are simulated and the dependences of instantaneous force values which the wing creates during movement are obtained. These forces allow the drone to move in space along a given trajectory. It is shown that the drone movement is controlled by changing the frequency and amplitude of the wing vibrations, as well as by changing the angle of the neutral line inclination relative to which the wing rotates.

Conclusions: a model of the reduced force arising from the flapping wing movement is proposed. Dependence graphs of the effective wing area (frontal area) for various parameters of changing rotation angles from time are constructed. Flapping wing motions of the aircraft is simulated. The range of parameters is defined at which the wing movement projections create horizontal F_{1x} and lifting F_{1z} forces at different values of area projections S_{1x} , S_{1y} , S_{1z} .

Keywords: flapping wing, lifting force, wing rotation angle, effective wing area.

Funding: the paper is supported by the grant "Implementation of the Strategic Academic Leadership Program "Priority-2030".

Reference for citing:

Evimov S.V. Mathematical modeling of flapping wing movements when interacting with a resisting medium / S.V. Efimov, O.V. Yemelyanova, S.F. Yatsun // Transport Engineering. - 2022. - no. 3. - p. 53 – 63 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-53-63.

Введение

Развитие научных технологий, появление новых современных легких и прочных материалов и электронных компонентов приводит к возрождению интереса к моделированию движения летательных аппаратов с машущим крылом (ЛИАМК), которые имитируют полет птиц или насекомых [11-13]. Такие механические устройства

обладают возможностью вертикального взлета, планирования, зависания над объектами, а также они достаточно маневренны, как их биологические объекты [11-13, 17]. Интерес к идее копирования машущего полета природных аналогов - очень велик, однако его реализация связана с особенностями аэродинамической теории и отсутствием

опыта разработки механизмов-приводов и их применения [1-12].

В природе крыло биологического объекта, например, птицы, реализует три вида вращения: вокруг оси, проходящей вдоль корпуса (взмахи вверх-вниз), поперечной оси корпуса (приводит к наклону крыла с целью изменения его угла атаки) и вокруг вертикальной оси, т.е. взмахи крыльев вперед и назад [11-14, 17]. Помимо

этих вращений, крыло птиц может изменять свою площадь во время взмаха для управления силой сопротивления в воздушной среде и развития подъемной силы [1-6]. В отличие от птиц, у большинства насекомых площадь крыла не изменяется во время взмаха, поэтому, в данной статье остановимся на изучении движения недеформируемого крыла насекомого [13, 14, 16].

Материалы, модели, эксперименты и методы

1. Моделирование движения машущего крыла

При моделировании машущего крыла летательного аппарата будем рассматривать его движение в абсолютной системе координат $OXYZ$ (рис. 1). Свяжем с корпусом робота относительную, подвижную систему координат $C_2X_2Y_2Z_2$, начало которой совпадает с центром тяжести корпуса C_2 . Ось C_2X_2 - направлена параллельно продольной оси корпуса, ось C_2Y_2 - направлена перпендикулярно плоскости $C_2X_2Z_2$, а ось C_2Z_2 - перпендикулярно плоскости $C_2X_2Y_2$. Плоскость $C_2X_2Z_2$ является плоскостью симметрии аппарата [1-6, 13,17].

Для описания движения крыльев 1,3 свяжем плоскостью крыла с системой координат $C_2X_iY_iZ_i$ ($i=1,3$), где C_2 - центр масс фюзеляжа (корпуса). Оси C_2X_i совпадают с осями поперечного вращения, а ось C_2Y_i принадлежит плоскостям крыльев,

совпадают с её кромкой и с продольной осью вращения крыла. Таким образом, системы координат $C_2X_iY_iZ_i$ ($i=1,3$) могут вращаться относительно корпуса вместе с крыльями, совершая двухкоординатное вращение, определяемое углами α_i , относительно осей C_2Y_i и φ_i , относительно осей C_2X_i .

Будем рассматривать крылья как два твердых тела, которые сочетают движения по углам φ_i и α_i , вносящие значительный вклад при формировании подъемной и тяговой сил.

Пусть $|\varphi_{32}^*| = |\varphi_{12}| = \pi - \varphi_{32}$, или

$$\varphi_{32} = \pi - \varphi_{12}. \quad (1)$$

При моделировании необходимо учесть важные кинематические параметра крыла, такие как амплитуда взмаха, частота и углы поворота α_i и φ_i , в зависимости от положения крыла [13-17].

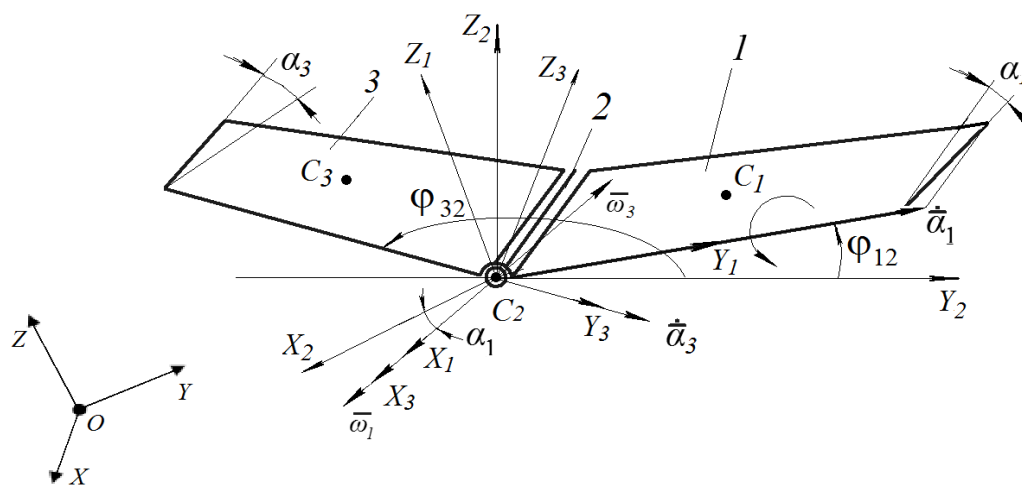


Рис.1. Схема систем координат, связанных с крыльями: 1,3 – крылья, 2 – фюзеляж (корпус)
Fig. 1. Diagram of the coordinate systems associated with wings: 1,3 - wings, 2 - fuselage (hull)

2. Кинематическая модель машущего крыла

Для удобства, будем рассматривать только крыло 1, положение которого определено поворотом на угол α_1 и последующим поворотом на угол φ_{12} (рис.

2) [13, 14]. Вращение крыла относительно оси C_2Y_1 происходит с угловой скоростью $\dot{\alpha}_1$, а относительно оси C_2X_1 - с угловой скоростью $\bar{\omega}_1 = \dot{\varphi}_{12}$.

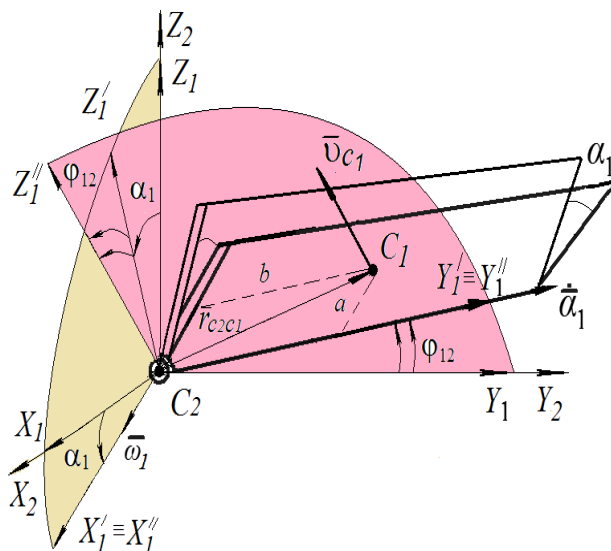


Рис. 2. Схема поворота системы координат крыла 1: \bar{v}_{C1} – скорость центра масс C_1 крыла; a, b – геометрические параметры

Fig. 2. The rotation scheme of the wing coordinate system 1: \bar{v}_{C1} is speed of the center of masses $C1$ of a wing; a, b - geometric parameters

Расстояние между точками C_2 и C_1 вдоль оси C_2X_2 равно a , вдоль оси C_2Z_2 - равно нулю, а вдоль оси C_2Y_2 - $-b$; a и b - переменные величины, зависящие от положения точки C_1 . Для приближенных расчетов примем их постоянными величинами.

Положение центра масс C_1 , во второй

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & 0 & \sin \alpha_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_1 & 0 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{12} & -\sin \varphi_{12} \\ 0 & \sin \varphi_{12} & \cos \varphi_{12} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

На данном этапе рассмотрим законы изменения углов поворота $\alpha_1(t)$ и $\varphi_{12}(t)$ при движении крыльев в виде гладких функций:

$$\alpha_1 = \alpha_1^1 + \alpha_1^0 \cos(\omega t + \gamma); \quad \varphi_{12} = \varphi_{12}^1 + \varphi_{12}^0 \sin \omega t, \quad (4)$$

$$\dot{\alpha}_1 = -\alpha_1^0 \omega \sin(\omega t + \gamma); \quad \dot{\varphi}_{12} = \varphi_{12}^0 \omega \cos \omega t, \quad (5)$$

где α_1^1, α_1^0 - отклонение от нейтральной линии крыла (ось X_2) и амплитуда колебаний крыла, относительно продольной оси (рис. 3); γ - угол сдвига фазы; φ_1^1, φ_1^0 -

(2) системе координат определяется радиус-вектором:

$$r_{C_2C_1}^{(2)} = T_{12} [-a, b, 0]^T. \quad (2)$$

Матрицы, определяющие векторы, заданные в первой (1) системе координат, с учетом двух вращений, имеют вид:

отклонение от нейтральной линии крыла (ось Y_2) и амплитуда колебаний крыльев, относительно поперечной оси (рис. 4); ω - угловая скорость.

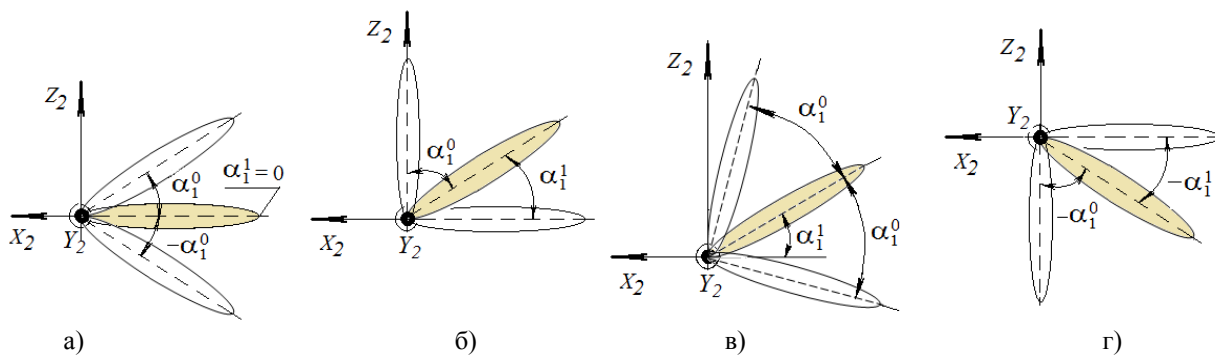


Рис. 3. Схема расположения крыла относительно продольной оси при следующих параметрах:
 а- $\alpha_1^1 = 0^0; \alpha_1^0 = 45^0; \gamma = 0$; б- $\alpha_1^1 = 45^0; \alpha_1^0 = 45^0$; в- $\alpha_1^1 = 30^0; \alpha_1^0 = 45^0$; г- $\alpha_1^1 = -45^0; \alpha_1^0 = -45^0$
 Fig. 3. The layout of the wing relative to the longitudinal axis with the following parameters: а-
 $\alpha_1^1 = 0^0; \alpha_1^0 = 45^0; \gamma = 0$; б- $\alpha_1^1 = 45^0; \alpha_1^0 = 45^0$; в- $\alpha_1^1 = 30^0; \alpha_1^0 = 45^0$; г- $\alpha_1^1 = -45^0; \alpha_1^0 = -45^0$

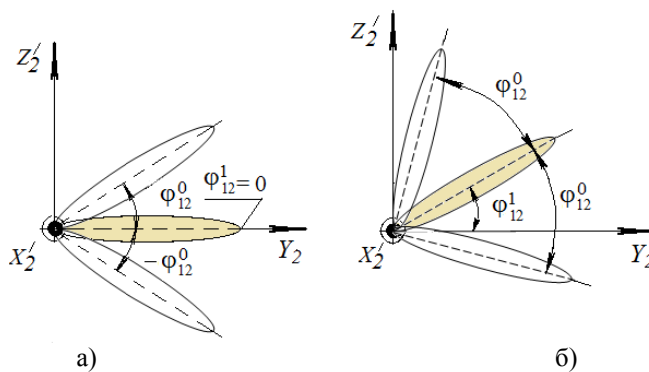


Рис. 4. Схема возможного расположения начального положения крыла 1 относительно поперечной оси:
 а - при $\varphi_{12}^1 = 0^0; \varphi_{12}^0 = 45^0$; б - при $\varphi_{12}^1 = 30^0; \varphi_{12}^0 = 45^0$
 Fig. 4. Diagram of the possible location of the initial position of the wing 1 relative to the transverse axis:
 а - при $\varphi_{12}^1 = 0^0; \varphi_{12}^0 = 45^0$; б - при $\varphi_{12}^1 = 30^0; \varphi_{12}^0 = 45^0$

На рис. 5, 6 представлены графики, иллюстрирующие изменение углов $\alpha_1(t)$ и

$\varphi_1(t)$ во времени для различных схем расположения крыла.

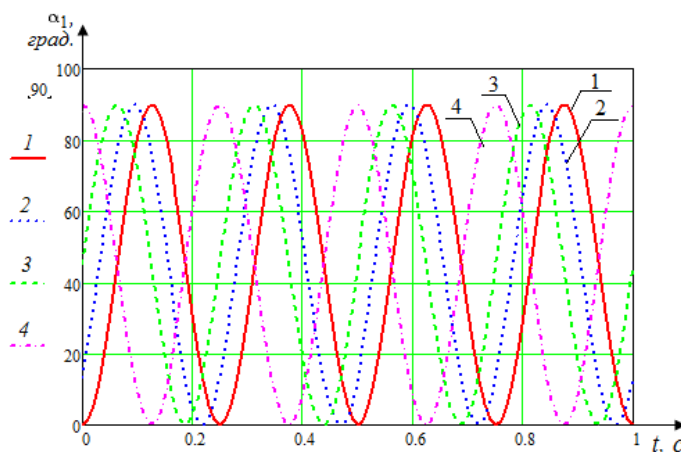


Рис. 5. Зависимости углов поворота α_1^1, α_1^0 крыльев от времени:
 1,2,3,4 соответствуют схемам а,б,в,г расположения крыла рис. 3 соответственно
 Fig. 5. The dependences of the angles of rotation of the wings on time:
 1,2,3,4 correspond to the schemes а,б,в,г of the wing arrangement of figure 3, respectively

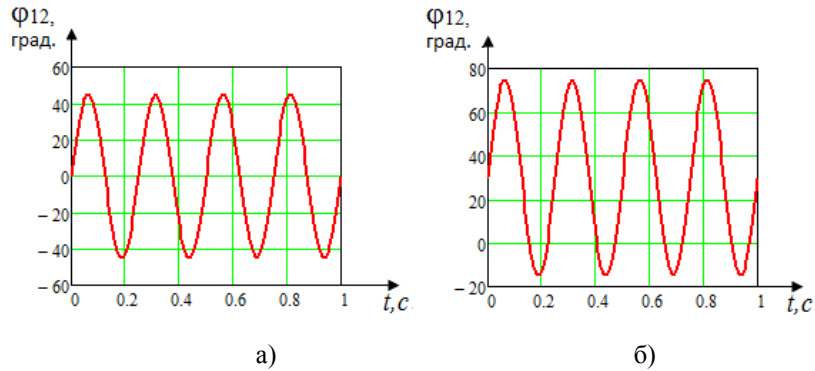


Рис. 6. Зависимости углов поворота $\varphi_{12}^1, \varphi_{12}^0$ крыльев от времени:

a – для схемы на рис. 4,а; *б* – для схемы на рис. 4,б

Fig. 6. The dependence of the angles of rotation of the wings on time:

a –for the scheme in figure 4,а; *b*–for the scheme in figure 4,б

Анализ графиков на рис. 5, 6 показывает, что существует сдвиг по фазе углов поворота крыльев в зависимости от их начального (нулевого) и последующего отклонения, относительно продольной и поперечной осей. Выявленные факторы можно использовать, для моделирования управления движением машущего крыла.

При движении крыла относительно корпуса вверх, его плоскость может поворачиваться на угол α_1^0 и становиться практически вертикальной (рис.3, в). В этот момент площадь миделева сечения S близка к нулю. При движении крыла

$$S_{1x} = S_0 \sin \alpha_1; \quad S_{1y} = S_0 \cos \alpha_1 \sin \varphi_{12}; \quad S_{1z} = S_0 \cos \alpha_1 \cos \varphi_{12} \quad (6)$$

где S_0 – площадь сечения крыла.

вниз плоскость крыла поворачивается и может становиться горизонтальной (рис. 3, а,б,г), при этом площадь миделева сечения достигает своего максимального значения. Соответственно, это приводит к увеличению силы сопротивления. Скорость изменения силы сопротивления зависит от того какой закон изменения площади миделева сечения принят для управления движением.

Площади проекций крыла l на плоскости, перпендикулярные осям C_2X_2, C_2Y_2, C_2Z_2 , представим как (рис. 7):

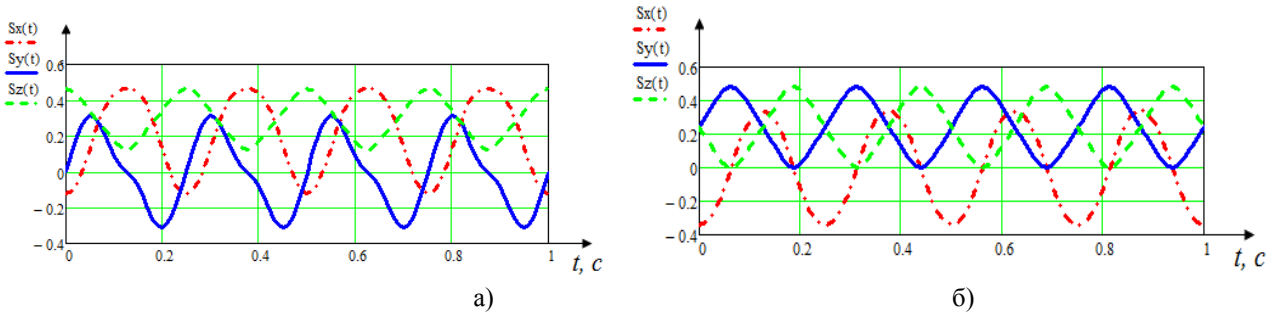


Рис. 7. Расчетные зависимости проекций площади крыла S_{1x}, S_{1y}, S_{1z} при периодическом движении крыла вверх-вниз от времени при частоте $\omega=25,12$ рад/с; $S_0=0,36 \times 0,4=0,48$ м² и следующих параметрах:

a - $\varphi_{12}^1=0; \alpha_1^1=30^\circ; \varphi_{12}^0=45^\circ; \alpha_1^0=45^\circ; \gamma=0^\circ$; *б* - $\varphi_{12}^1=45^\circ; \alpha_1^1=45^\circ; \varphi_{12}^0=45^\circ; \alpha_1^0=45^\circ; \gamma=0$

Fig. 7. Calculated dependences of the wing area projections S_{1x}, S_{1y}, S_{1z} with periodic up-and-down wing movement on time at a frequency of $\omega=25.12$ rad/s; $S_0=0.36 \times 0.4=0.48$ m² and the following parameters:

a - $\varphi_{12}^1=0; \alpha_1^1=30^\circ; \varphi_{12}^0=45^\circ; \alpha_1^0=45^\circ; \gamma=0^\circ$; *б* - $\varphi_{12}^1=45^\circ; \alpha_1^1=45^\circ; \varphi_{12}^0=45^\circ; \alpha_1^0=45^\circ; \gamma=0$

3. Определение силы взаимодействия крыла с воздухом

Рассмотрим схемы внешней распределенной силы взаимодействия с сопро-

тивляющей средой \bar{F} , приложенной в точке C_1 , при движении крыльев вверх (рис. 8, а) и вниз (рис. 8, б).

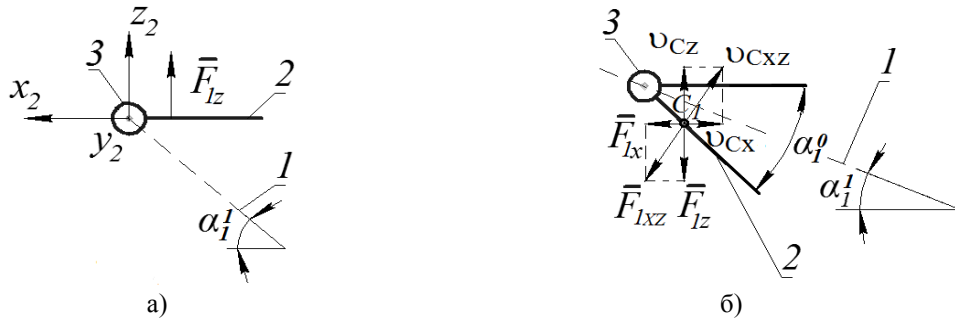


Рис. 8. Схема работа при относительном движении: а – вниз; б – вверх; 1 – нейтральная линия крыла относительно корпуса; 2 – крыло; 3 – корпус
Fig. 8. The diagram of the robot wing with relative motion: a – down; b – up; 1 – the neutral line of the wing relative to the body; 2 – the wing; 3 – the body

Здесь приняты следующие обозначения v_{Cx}, v_{Cz} – проекции скорости центра масс C_1 на оси связанной с корпусом си-

стемы координат, \bar{F}_1 – приведенная сила взаимодействия крыла с воздухом.

В общем случае: $\bar{v}_{C1} = (\bar{v}_{Cx}, \bar{v}_{Cxy}, \bar{v}_{Cz})^T$, или $\bar{v}_{C1} = (\bar{v}_{Cxz}, \bar{v}_{Cxy})^T$.

Силу \bar{F}_1 представим в виде вектора:

$$\bar{F}_1 = (\bar{F}_{1x}, \bar{F}_{1y}, \bar{F}_{1z})^T, \quad (7)$$

где F_{1x}, F_{1y}, F_{1z} – проекции силы крыла I на оси подвижной второй ⁽²⁾ системы координат:

$$F_{1x} = -\frac{1}{2} C \rho |S_{1x}| |v_{Cx}| v_{Cx}; \quad F_{1y} = -\frac{1}{2} C \rho |S_{1y}| |v_{Cy}| v_{Cy}; \quad F_{1z} = -\frac{1}{2} C \rho |S_{1z}| |v_{Cz}| v_{Cz}, \quad (8)$$

где C – безразмерный коэффициент лобового сопротивления, ρ – плотность воздуха.

симости от скорости движения крыла и модуля его площади [11-14].

Анализ формул (8) показывает, что продольная F_{1x} , поперечная F_{1y} и подъемная F_{1z} силы крыла изменяются в зави-

Уравнения проекции скоростей центра масс крыла \bar{v}_{C1} на оси связанной, первой ⁽¹⁾ системы координат, полученные на основании кинематических уравнений, изложенных в [14,17], будут иметь вид:

$$\begin{aligned} v_{x_{C1}} &= b(\dot{\alpha}_1 \cos \varphi_{12} \cos \alpha_1 - \dot{\varphi}_{12} \sin \varphi_{12} \sin \alpha_1) - a(\dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \varphi_{12} + \dot{\varphi}_{12} \cos \varphi_{12} \sin \alpha_1); \\ v_{y_{C1}} &= -b \dot{\varphi}_{12} \cos \varphi_{12} + a \varphi_{12} \sin \varphi_{12}; \\ v_{z_{C1}} &= -b(\dot{\alpha}_1 \cos \varphi_{12} \sin \alpha_1 + \dot{\varphi}_{12} \sin \varphi_{12} \cos \alpha_1) + a(\dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 \sin \varphi_{12} - \dot{\varphi}_{12} \cos \varphi_{12} \cos \alpha_1). \end{aligned} \quad (9)$$

Результаты

На основании уравнений (8) с учетом (6) и (9) проведем моделирование проекций силы $F_1(F_{1x}, F_{1y}, F_{1z})^T$ в зависимости от времени при следующих параметрах $a=0,2$ м; $b=0,6$ м; $\omega=25,12$ рад/с; $C=0,5$; $\rho=1,29$ кг/м³.

Определим средние за период значения продольной $F_{1x}^{(cp)}$, поперечной $F_{1y}^{(cp)}$ и подъемной $F_{1z}^{(cp)}$ сил крыла для графиков рис. 9 (таблица):

$$F_{1x}^{(cp)} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F_{1x} dt; \quad F_{1y}^{(cp)} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F_{1y} dt; \quad F_{1z}^{(cp)} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F_{1z} dt. \quad (10)$$

Средние значения проекции силы \bar{F}_1

Table

Average force projection values \bar{F}_1

Рис. 9	$F_{1x}^{(cp)}$	$F_{1y}^{(cp)}$	$F_{1z}^{(cp)}$
a	0,216	0	0
б	0,317	1,133	0,407
в	0,039	1,694	-0,918

Анализ графиков на рис. 9, а так же средние за период значения силы $\bar{F}_1 = (\bar{F}_{1x}, \bar{F}_{1y}, \bar{F}_{1z})^T$ крыла показывают, что характер изменения проекций силы существенно зависит от параметров, задающих движение крыла $\varphi_{12}^1; \alpha_1^1; \varphi_{12}^0; \alpha_1^0; \gamma$.

Изменяя эти постоянные, можно получить силы, обеспечивающие подъем летательного аппарата (рис. 9, б), движение по горизонтальной прямой (рис. 9, а) и спуск (рис. 9, в).

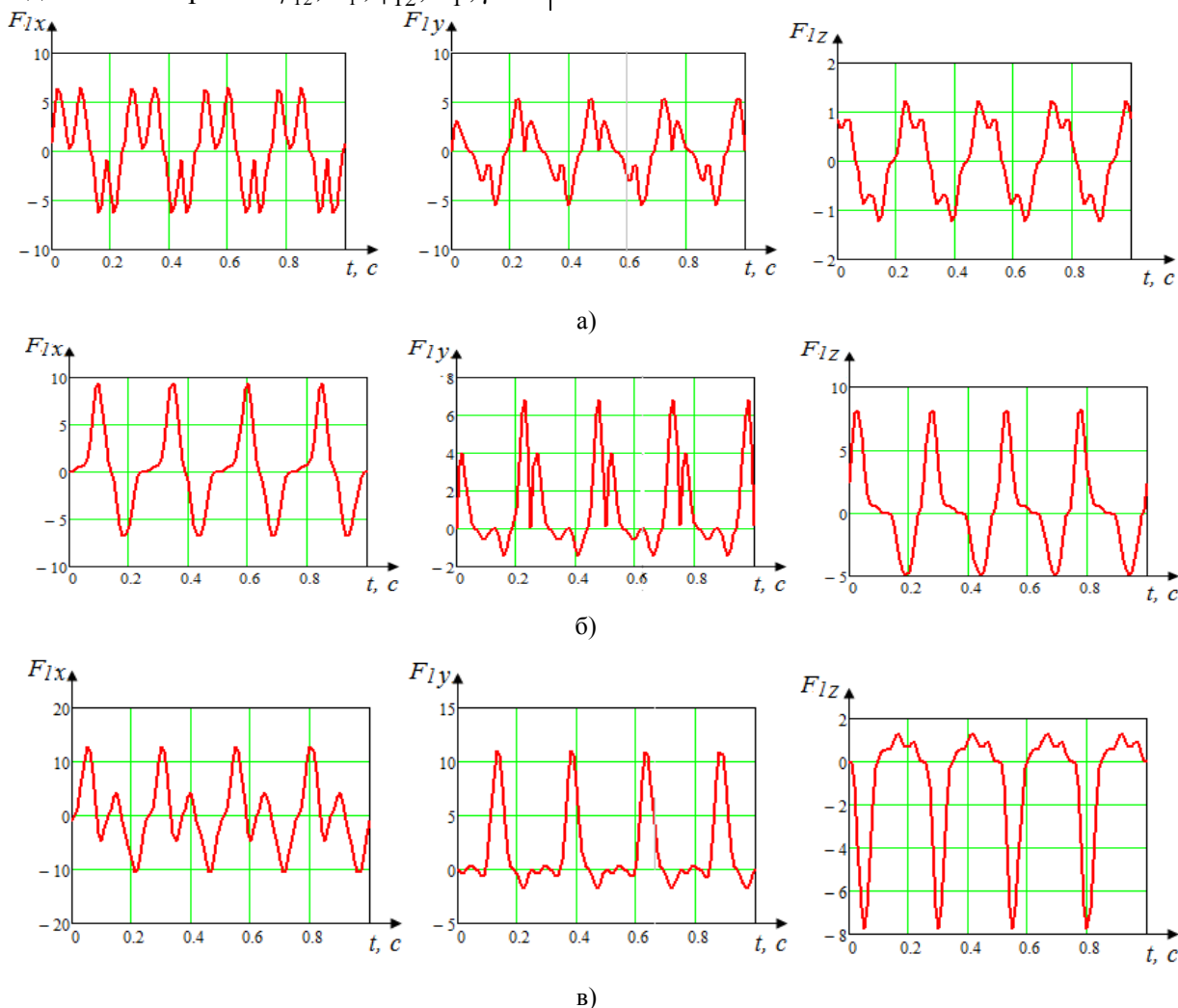


Рис. 9. Зависимости проекций силы \bar{F} взаимодействия крыла с воздухом от времени при следующих параметрах: а - $\varphi_{12}^1 = \alpha_1^1 = 0$; $\varphi_{12}^0 = \alpha_1^0 = 45^\circ; \gamma = 0$; б - $\varphi_{12}^1 = 0$; $\alpha_1^1 = -45^\circ$; $\varphi_{12}^0 = \alpha_1^0 = 45^\circ; \gamma = 0$;

$$в - \varphi_{12}^1 = -30^\circ; \alpha_1^1 = 30^\circ; \varphi_{12}^0 = 60^\circ; \alpha_1^0 = 60^\circ; \gamma = 0$$

Fig. 9. The dependences of the projections of the force \bar{F} of the interaction of the wing with the air on time with the following parameters: а - $\varphi_{12}^1 = \alpha_1^1 = 0$; $\varphi_{12}^0 = \alpha_1^0 = 45^\circ; \gamma = 0$; б - $\varphi_{12}^1 = 0$; $\alpha_1^1 = -45^\circ$; $\varphi_{12}^0 = \alpha_1^0 = 45^\circ; \gamma = 0$;

$$в - \varphi_{12}^1 = -30^\circ; \alpha_1^1 = 30^\circ; \varphi_{12}^0 = 60^\circ; \alpha_1^0 = 60^\circ; \gamma = 0$$

Заключение

В результате исследований предложена модель приведенной силы, возникающей при движении машущего крыла. Построены графики зависимостей эффективной площади крыла (площади миделева сечения) для различных параметров законов изменения углов поворота от времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jatsun S., Efimov S., Emelyanova O., Leon A.S.M., Davalos P.J.C. Modeling and control architecture of an autonomous mobile aerial platform for environmental monitoring. In *2019 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*. IEEE, 2019. P. 177-182. doi: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00036.
2. Jatsun S.F., Korenevskiy N.A., Efimov S.V., Korovin E.N. An Automated System for Monitoring the Environment and Assessing People's Status in Extreme Situations Using a Flying Robot. *Biomedical Engineering*. 2018;52(4). doi: 10.1007/s10527-018-9832-x.
3. Karimian S., Jahanbin Z. Bond graph modeling of a typical flapping wing micro-air-vehicle with the elastic articulated wings. *Meccanica*. 2020;55(6): 1263-1294. DOI: 10.1007/s11012-020-01162-w
4. Nguyen K., Au L.T.K., Phan H.V., Park S.H., Park H.C. Effects of wing kinematics, corrugation, and clap-and-fling on aerodynamic efficiency of a hovering insect-inspired flapping-wing micro air vehicle. *Aerospace Science and Technology*. 2021;118: 106990. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106990.
5. Smart bird. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SmartBird>.
6. SmartBird. URL: <https://www.festo.com/group/ru/cms/10238.htm>.
7. Vorochaeva L.Y., Efimov S.V., Loktionova O.G., Yatsun S.F. Motion Study of the Ornithopter with Periodic Wing Oscillations. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2018;57(4):672-687. doi: 10.1134/S1064230718040147.
8. Word Science. URL: <http://wordscience.org/uchenye-garvarda-sozdali-letayushhego-robota- robo-fly.html>.
9. Yoon S.H., Cho H., Lee J., Kim C., Shin S.J. Effects of camber angle on aerodynamic performance of flapping-wing micro air vehicle. *Journal of Fluids and Structures*. 2020;97:103101. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.103101.
10. Емельянова О.В., Поляков Р.Ю., Ефимов С.В., Яцун С.Ф. Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания. *Фундаментальные и прикладные проблемы техни*
1. Jatsun S., Efimov S., Emelyanova O., Leon A.S.M., Davalos P.J.C. Modeling and control architecture of

Проведено моделирование машущего движения крыльев летательного аппарата. Определена область параметров, при которых проекции перемещения крыла создают горизонтальную F_{Ix} , и подъёмную F_{Iz} силы при различных значениях проекций площадей S_{Ix} , S_{Iy} , S_{Iz} .

- ники и технологии, 2018;3(329):136-141. ISBN: 978-5-9929-0514-4.
11. 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;2(11):252-256. ISSN 1812-7339.
12. Поляков Р.Ю., Яцун С.Ф. Моделирование полета инсектоптера для исследования параметров машущего крыла. *Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии*. 2020. С. 431-436. ISBN: 978-5-00151-153-3.
13. Поляков Р.Ю., Яцун С.Ф. Математическое моделирование полета стрекозоподобного мини-робота. *Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии*. 2020. С. 467-473. ISBN: 978-5-00151-153-3.
14. Поляков Р.Ю. Мобильная приборная платформа для системы экологического мониторинга загрязнения токсичными газами атмосферного воздуха: специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: дис. на соискание научной степени канд. тех. наук / Поляков Роман Юрьевич; Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2019. 165 с. Библиогр.: с. 154-165. <https://www.dissercat.com/>
15. Поляков Р. Ю., Ефимов С. В., Яцун С.Ф. Робот-инсектоптер для мониторинга окружающей среды *Современные проблемы гражданской защиты*. 2015. № 3 (16). ISSN 2658-6223.
16. Поляков Р.Ю., Ефимов С.В., Валуйский В.Е., Мозговой Н.В. Проведение исследования движения многозвенного летающего робота для мониторинга окружающей среды. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. 2014;1(1 (5)). ISSN 2411-3778.
17. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Ворочаева Л.Ю., Емельянова О.В. Конструкция и система управления робота-орнитоптера, оснащенного крыльями и хвостом. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018; 22(2):18-26. doi:10.21869/2223-1560-2018-22-2-18-26.

an autonomous mobile aerial platform for environmental monitoring. In *2019 International Confer-*

- ence on Information Systems and Computer Science (INCISCOS). IEEE, 2019. P. 177-182. doi: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00036.
2. Jatsun S.F., Korenevskiy N.A., Efimov S.V., Korovin E.N. An Automated System for Monitoring the Environment and Assessing People's Status in Extreme Situations Using a Flying Robot. *Biomedical Engineering*. 2018;52(4). doi: 10.1007/s10527-018-9832-x.
 3. Karimian S., Jahanbin Z. Bond graph modeling of a typical flapping wing micro-air-vehicle with the elastic articulated wings. *Meccanica*. 2020;55(6): 1263-1294. DOI: 10.1007/s11012-020-01162-w
 4. Nguyen K., Au L.T.K., Phan H.V., Park S.H., Park H.C. Effects of wing kinematics, corrugation, and clap-and-fling on aerodynamic efficiency of a hovering insect-inspired flapping-wing micro air vehicle. *Aerospace Science and Technology*. 2021;118: 106990. doi: 10.1016/j.ast.2021.106990.
 5. Smart bird. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SmartBird>.
 6. SmartBird. URL: <https://www.festo.com/group/ru/cms/10238.htm>.
 7. Vorochaeva L.Y., Efimov S.V., Loktionova O.G., Yatsun S.F. Motion Study of the Ornithopter with Periodic Wing Oscillations. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2018;57(4):672-687. doi: 10.1134/S1064230718040147.
 8. Word Science. URL: <http://wordscience.org/uchenye-garvarda-sozdali-letayushhego-robota- robo-fly.html>.
 9. Yoon S.H., Cho H., Lee J., Kim C., Shin S.J. Effects of camber angle on aerodynamic performance of flapping-wing micro air vehicle. *Journal of Fluids and Structures*. 2020;97:103101. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.103101.
 10. Emelyanova O.V., Polyakov R.Yu., Efimov S.V., Jatsun S.F. Mobile aircraft complex for rapid detection of fire area. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*, 2018;3(329):136-141. ISBN: 978-5-9929-0514-4.
 11. Efimov S.V. Korshunov E.V., Polyakov R.Yu., Tarasov O.S., Jatsun S.F. Experimental studies of the parameters of a flapping wing for a jumping and flying robot. *Fundamental Research*. 2015;2(11):252-256. ISSN 1812-7339.
 12. Polyakov R.Yu., Jatsun S.F. Flight simulation of an insectopter to study the parameters of a flying wing. *Control Systems, Complex Systems: Modeling, Stability, Stabilization, Intelligent Technologies*. 2020. pp. 431-436. ISBN: 978-5-00151-153-3.
 13. Polyakov R.Yu., Jatsun S.F. Mathematical modeling of the mini-robot flight of a dragonfly type. *Control Systems, Complex Systems: Modeling, Stability, Stabilization, Intelligent Technologies*. 2020. pp. 467-473. ISBN: 978-5-00151-153-3.
 14. Polyakov R.Yu. Mobile instrument platform for monitoring the system of environmental pollution of the air by toxic gases: specialty 05.11.13 "Devices and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products": D.Ph. thesis / Polyakov Roman Yuryevich; The Southwest State University . Kursk, 2019. 165 p. Bibliogr.: pp.154-165. <https://www.dissercat.com/>
 15. Polyakov R. Yu., Efimov S. V., Jatsun S.F. Robot-insectopter for environmental monitoring. *Modern Problems of Civil Protection*. 2015. no. 3 (16). ISSN 2658-6223.
 16. Polyakov R.Yu., Efimov S.V., Valuiskiy V.E., Mozgovoy N.V. The study of the movement of a multielement flying robot for environmental monitoring. *Fire Safety: Problems and Prospects*. 2014;1(1 (5)). ISSN 2411-3778.
 17. Jatsun S.F., Loktionova O.G., Vorochaeva L.Yu., Emelyanova O.V. Design and control system of an ornithopter robot equipped with wings and tail. *Proceedings of the Southwestern State University*. 2018: 22(2):18-26. doi:10.21869/2223-1560-2018-22-2-18-26.

Информация об авторах:

Ефимов Сергей Венегдитович, кандидат технических наук, докторант кафедры «Механика, мехатроника и робототехника» Юго-Западного государственного университета, тел.8(412) 22-22-26.

Емельянова Оксана Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика, мехатроника и робототехника» Юго-Западного государственного университета, тел.8(412) 22-22-26; Scopus-Author ID: 57193675192, Author-ID-РИНЦ 1793-8084.

Efimov Sergey Venegditovich, Candidate of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics at The Southwest State University, phone: 8(412) 22-22-26.

Яцун Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика, мехатроника и робототехника» Юго-Западного государственного университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ; тел.8(412) 22-22-26; Scopus-Author ID 55884423000; Research-ID - Web of Science G-3891-2017; Author-ID-РИНЦ 4498-5644.

Emelyanova Oksana Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics at The Southwest State University, phone: 8(412) 22-22-

26; Scopus-Author ID: 57193675192, Author-ID-RSCI 1793-8084.

Jatsun Sergey Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics at The Southwest State Universi-

ty, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, phone: 8(412) 22-22-26; Scopus-Author ID 55884423000; Research-ID - Web of Science G-3891-2017; Author-ID-RSCI 4498-5644.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 11.12.2021; одобрена после рецензирования 22.12.2021; принята к публикации 18.02.2022. Рецензент – Рассоха В.И., доктор технических наук, доцент, декан Транспортного факультета Оренбургского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.12.2021; approved after review on 22.12.2021; accepted for publication on 18.02.2022. The reviewer is Rossokha V.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Transport Department at Orenburg State University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.