

УДК 629.7.014.16

ПРЫГАЮЩИЙ СТРЕКОЗОПОДОБНЫЙ МИНИРОБОТ

Ефимов С.В., Поляков Р.Ю., Ворочаева Л.Ю., Яцун С.Ф.

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

В статье рассмотрен прыгающий робот, оснащенный системой крыльев, раскрывающихся в верхней точке прыжка и обеспечивающих полет, аналогичный полету насекомых. Такие аппараты получили название инсектоптеры. Они оснащены двумя оппозитно двигающимися крыльями, установленными на фюзеляже, где также установлено хвостовое оперение, оснащенное рулями высоты и направления. Крылья с изменяемыми параметрами и геометрией приводятся в движение с помощью электродвигателя и специальной трансмиссии. Полет инсектоптера разделен на этапы: набор высоты происходит в соответствии с выбранным законом изменения вертикальной координаты, на следующем этапе устройство начинает движение в горизонтальной плоскости в заданную точку пространства. На основе разработанной математической модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА) выполнено математическое моделирование полета. Спроектирован и изготовлен прототип БПЛА-стрекозы, который оснащен оппозитными машущими крыльями. Предложена методика определения приведенных сил тяги и подъемной силы. Установлена линейная зависимость между частотой колебаний крыльев и величиной этих сил, определены коэффициенты пропорциональности. Проведено сравнение результатов математического моделирования и экспериментов, которые показывают удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: прыгающе-летающие роботы, математическое моделирование полёта

DRAGONFLY-LIKE JUMPING MINIROBOT

Efimov S.V., Polyakov R.Y., Vorochaeva L.Y., Yatsun S.F.

Southwest State University, Kursk, e-mail: teormeh@inbox.ru

In the article, the jumping robot equipped by a system of wings, which activating at the upper phase of jumping and provides insects-like flight, was described. Such devices are called insectcopters. These robots are equipped by two oppositely moving wings mounted on the fuselage. The fuselage is also equipped by the tail unit with elevators and rudder. Wings with variable parameters and geometry are driven by an electric motor with special transmission. The flight of the insectcopter is divided into the following stages: the climb takes place in accordance with the chosen law of vertical coordinate change, in the next stage the device begins to move in a horizontal plane towards the given point in space. Authors describe a mathematical model of an unmanned aerial vehicle (UAV) and results of numerical simulation of the robot. The prototype of dragonfly-like UAV, which is equipped by oppositely moving wings, was designed. The method of determining the reduced forces of traction and lift was proposed. The linear dependence between the oscillation frequency of the wings and the value of the forces was established, the proportionality coefficients were defined. The comparison of the results of mathematical modeling and experiments was carried out.

Keywords: dragonfly-like jumping robots, mathematical modeling of flight

С развитием робототехники все больший интерес проявляется к бионике – науке, которая изучает характер движения живых организмов, а также явления и процессы, протекающие в них. В природе распространены прыгающие и летающие насекомые. Копирование природных идей при создании роботов позволяет быстро и эффективно достичь поставленных результатов. Такой подход особенно востребован при создании роботов, способных скрытно перемещаться в пространстве для выполнения задач, связанных со сбором информации. Особый интерес представляют прыгающе-летающие роботы, в которых реализованы принципы полета насекомых. Такие роботы получили название инсектоптеры. Одним из преимуществ робота-инсектоптера является то, что энергопотребление при прочих равных по сравнению с традиционными схемами, например мультироторного типа, значительно ниже. Крылья с изменяемыми параметрами

и геометрией могут быть переориентированы и адаптированы под текущие условия в каждый момент полета летательного аппарата, что позволяет максимально использовать энергию воздушных потоков и увеличить дальность свободного планирования. Поэтому ведущие научные центры мира ведут разработки по созданию малогабаритных летающих роботов с машущим крылом [1–7].

Описание робота

Рассматриваемый робот-стрекоза оснащен двумя оппозитно двигающимися крыльями, установленными на фюзеляже. В движение крылья приводятся с помощью электродвигателя и специальной трансмиссии, состоящей из синхронизатора и двух кривошипно-коромысловых механизмов. На фюзеляже также установлено хвостовое оперение, оснащенное рулями высоты и направления. При подаче напряжения на

электродвигатель вращение передается на редуктор, а затем на зубчатую цилиндрическую передачу синхронизатора, которая представляет собой два зубчатых колеса одинакового диаметра, находящихся в зацеплении друг с другом и с шестерней, установленной на выходном валу редуктора. Мембраны крыльев, изготовленные из эластичного материала, закреплены на стрингерах, выполненных из жесткого материала (углепластика), создают необходимое тяговое усилие при схлопывании или разведении пары крыльев. Такая схема крыльев является уравновешенной и позволяет создавать реактивную струю воздуха, обеспечивающую соответствующее тяговое усилие и необходимую подъемную силу.

Модель робота-инсектоптера

Рассмотрим схему робота-инсектоптера, представленную на рис. 1. Движение такого объекта происходит в абсолютной системе координат $Oxyz$. С корпусом робота связана относительная, подвижная система координат $C_2x_2y_2z_2$, начало которой совпадает с центром тяжести корпуса C_2 . Ось C_2x_2 такой системы координат 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 робота [3–5].

Центр масс корпуса движется в пространстве со скоростью $v_{C_2} = (v_{C_2}^x, v_{C_2}^y, v_{C_2}^z)^T$, а робот вращается вокруг центра масс с угловой скоростью $\bar{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ под действием распределенных сил, возникающих в результате взаимодействия элементов системы с окружающей средой F_p , приведенных к сосредоточенным силам тяги $T = (T, 0, 0)^T$, подъемной силе $Q = (0, 0, Q)^T$ и $R_2 = (R_{2x2}, R_{2y2}, R_{2z2})^T$ – силы, действующей на хвостовое оперение со стороны набегающего потока воздуха. Кроме этого, учтены и силы веса

$$G = (0, 0, -\sum m_i g)^T.$$

Далее принято допущение о том, что угловая скорость вращения крыла значительно выше угловой скорости вращения корпуса, что позволяет значительно упростить уравнения, описывающие вращательное движение робота. Кроме этого, принято, что мембраны крыла являются недеформируемыми невесомыми пластинами, имеющими возможность поворота относительно стрингера.

Полет инсектоптера можно разложить на несколько этапов, которые осуществляются под действием управляющих воздействий, поступающих со стороны бортовой системы управления. В первую очередь осуществляется отрыв от опорной поверхности и взлет. Набор высоты происходит в соответствии с выбранным законом

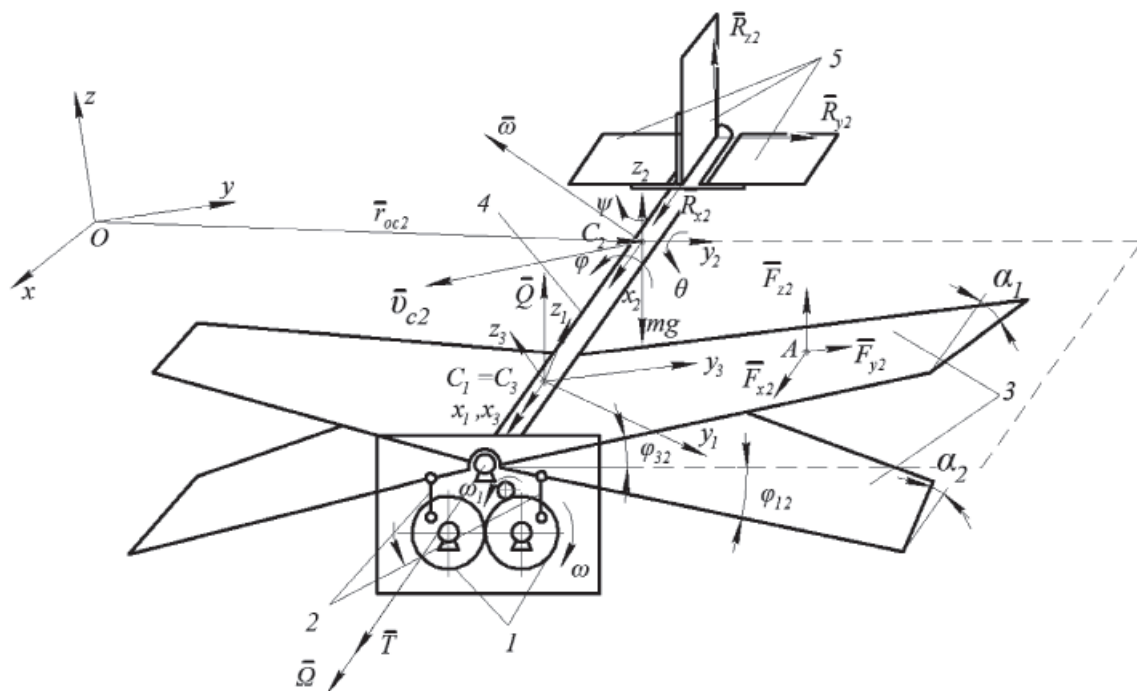


Рис. 1. Расчетная схема робота-инсектоптера

изменения вертикальной координаты, после чего устройство начинает движение в горизонтальной плоскости в заданную точку пространства. В этой точке можно реализовать режим зависания, позволяющий производить разведку местности, видеосъемку и осуществлять необходимые измерения. После выполнения задания инсектоптер возвращается в исходную или любую определенную в задании точку и осуществляет посадку.

Для реализации автономного полета предложена схема системы автоматического управления (рис. 2), в соответствии с которой определение реальных координат робота осуществляется с помощью установленных в системе управления GPS-навигатора, гироскопа и альтиметра. Обработка данных, поступающих с датчиков, сравнение их с заданными, нахождение управляющих воздействий по от-

клонениям реальных координат от заданных, происходит в блоке обработки информации. Управляющие напряжения определяются с помощью многоканального регулятора и поступают на соответствующие электроприводы (ОУ). Модель робота-инсектоптера связывает три управляющих воздействия: угловая скорость вращения электродвигателя, углы поворота рулей высоты и направления ω , φ_2 , φ_3 , с шестью управляемыми координатами $X, Y, Z, \varphi, \psi, \theta$, которые позволяют роботу двигаться по заданной пространственной траектории.

Для определения приведенной силы тяги T и подъемной силы Q , создаваемых крылом, были проведены экспериментальные исследования на специальном стенде. Для этого был разработан и изготовлен прототип робота-стрекозы, общий вид которого приведен на рис. 3.

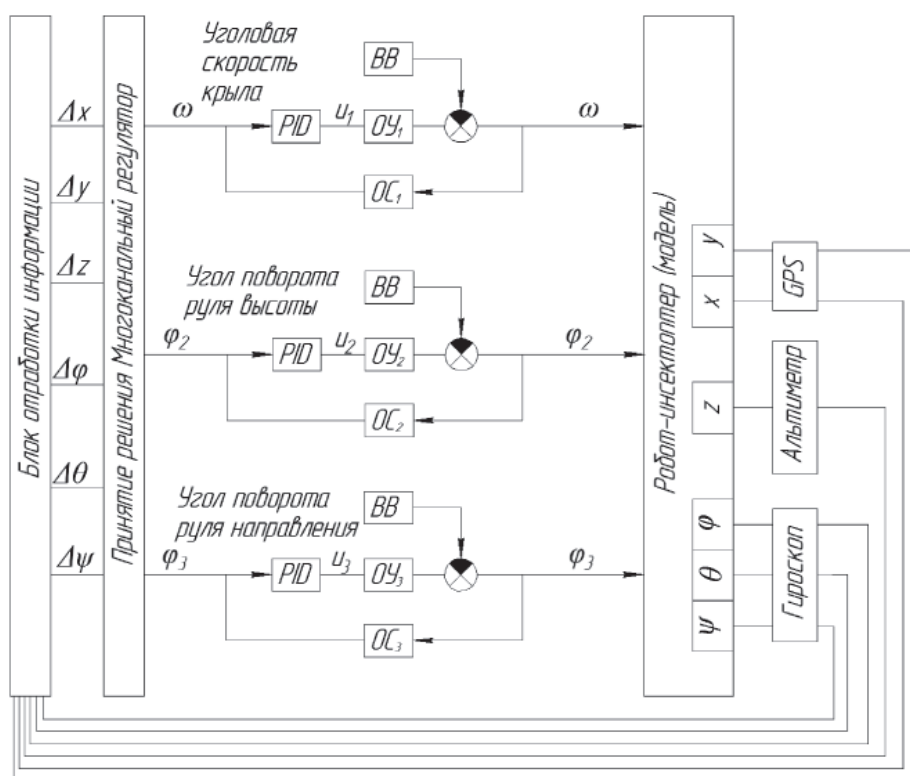


Рис. 2. Функциональная схема бортовой системы управления

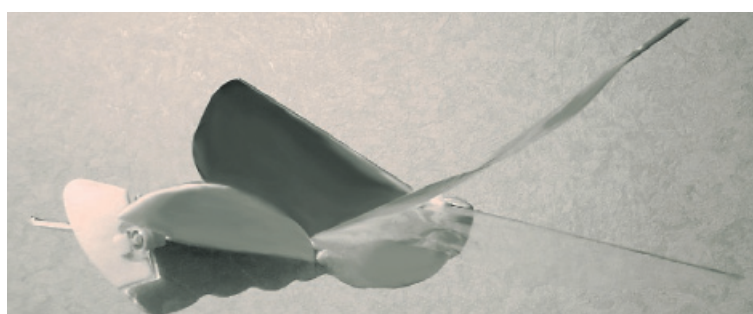


Рис. 3. Общий вид прототипа робота-стрекозы

Сравнение результатов математического моделирования и экспериментов

Для изучения движения выполнено математическое моделирование движения прототипа робота, имеющего следующие параметры: вес корпуса $m_1 = 0,02$ кг; вес крыльев $m_2 = 0,017$ кг; длина крыла $l = 0,35$ м. Результаты математического моделирования сравнивались с экспериментальными данными в режимах взлёта на определенную высоту H , полета в горизонтальной плоскости и приземления инсектоптера (рис. 4).

Заключение

Разработана математическая модель робота-стрекозы с оппозитно движущимися крыльями с учетом свойств кривошипно-коромыслового электропривода и двухкоординатного вращения крыльев. Выполнено математическое моделирование полета робота. Спроектирован и изготовлен прототип летающего робота, оснащенный оппозитными машущими крыльями. Предложена методика определения приведенных сил тяги и подъемной силы. Установлена линейная зависимость между частотой

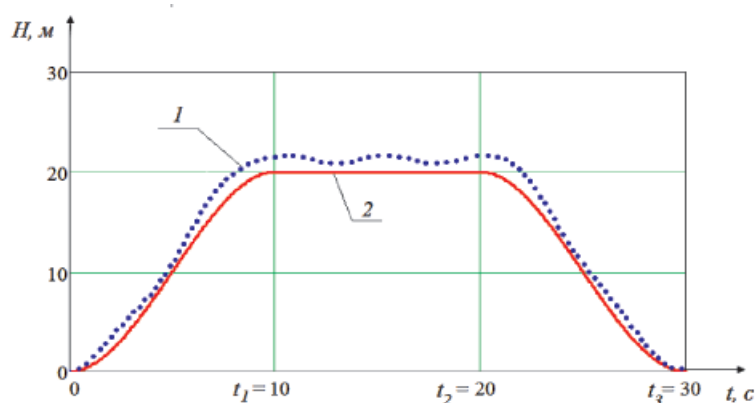


Рис. 4. Изменение вертикальной координаты в режимах взлёта, полета в горизонтальной плоскости и приземления инсектоптера во времени: 1 – эксперимент; 2 – теория

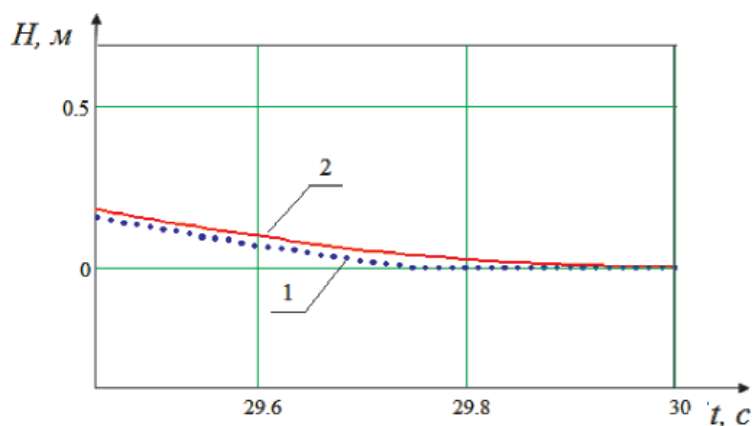


Рис. 5. Зависимость перемещения по оси z при приземлении инсектоптера ($t = 29,7$ с): 1 – эксперимент; 2 – теория

Особое внимание уделено изучению процесса посадки инсектоптера. Путем изменения параметров управляющих воздействий удалось обеспечить посадку робота практически с нулевой вертикальной скоростью (рис. 5).

колебаний крыльев и величиной этих сил, определены коэффициенты пропорциональности. Проведено математическое моделирование и экспериментальные исследования по пространственному движению робота, сравнение теоретических

результатов с экспериментальными показыва-
ет удовлетворительную сходимость.

*Исследование выполнено при финансо-
вой поддержке РФФИ в рамках научного
проекта № 14-08-00581 а.*

Список литературы

1. Яцун С.Ф. Моделирование движения многозвенно-
го прыгающего робота и исследование его характеристик /
С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Известия РАН. Теория и систе-
мы управления. – 2013. – № 4. – С. 137–149.
2. Яцун С.Ф. Этапы движения четырехзвенного ро-
бота, перемещающегося с отрывом от поверхности /
С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, Л.Ю. Волкова, А.В. Воро-
чаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Инфор-
матика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 5. –
С. 109–118.
3. Яцун С.Ф. Прыгающий робот для проведения по-
исковых работ / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова, А.В. Ворочаев // *Экстремальная робототехника – робототехника для работы
в условиях опасной окружающей среды: труды 7-го между-
народного симпозиума.* – СПб., 2013. – С. 152–159.
4. Яцун С.Ф. Исследование влияния длин звеньев кры-
ла орнитоптера на его кинематические характеристики /
С.Ф. Яцун, С.Е. Ефимов, Г.С. Наумов // Четырнадцатая на-
циональная конференция по искусственному интеллекту
с международным участием КИИ-2014: труды конференции.
Т.3. – Казань, 2014. – С. 359–365.
5. Локтионова О.Г. Исследование движения пры-
гающего робота, оснащенного крыльями с изменяемой
геометрией / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Ворочаева, А.В. Вороча-
ев // Четырнадцатая национальная конференция по ис-
кусственному интеллекту с международным участием
КИИ-2014: труды конференции. Т.3. – Казань: Изд-во
РИЦ «Школа», 2014. – С. 307–314. – Казань, 2014. –
Т. 3. – С. 307–314.
6. Яцун С.Ф. Исследование влияния точки закрепления
крыла на полет прыгающего летающего робота / С.Ф. Яцун,
Л.Ю. Ворочаева, А.В. Ворочаев // Экстремальная робото-
техники // Труды международной научно-технической кон-
ференции. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. –
С. 65–70.
7. Черноусько Ф.Л. Оптимальное управление движе-
нием многозвенной системы в среде с сопротивлением // *ПММ.* – 2012. – Т. 76. – Вып. 3. – С. 355–373.

References

1. Jacun S.F. Modelirovanie dvizhenija mnogozvennogo
prygajushhego robota i issledovanie ego harakteristik / S.F. Ja-
cun, L.Ju. Volkova // *Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravleni-
ja.* 2013. no. 4. pp. 137–149.
2. Jacun S.F. Jetapy dvizhenija chetyrehzvennogo robota,
peremeshhajushhegosja s otrывom ot poverhnosti / S.F. Jacun,
O.G. Loktionova, L.Ju. Volkova, A.V. Vorochaev // *Nauchno-
tehnicheskie vedomosti SPBGPU. Informatika. Telekommuni-
kacii. Upravlenie.* 2013. no. 5. pp. 109–118.
3. Jacun S.F. Prygajushhij robot dlja provedenija poiskovyh
rabort / S.F. Jacun, L.Ju. Volkova, A.V. Vorochaev // *Jekstremal-
naja robototehnika robototehnika dlja raboty v uslovijah opasnoj
okruzhajushhej sredy: trudy 7-go mezhdunarodnogo simpozi-
uma.* Sankt-Peterburg. 2013. pp. 152–159.
4. Jacun S.F. Issledovanie vlijanija dlin zvenev kryla ornitop-
tera na ego kinematische harakteristiki / S.F. Jacun, S.E. Efi-
mov, G.S. Naumov // *Chetyrnadcataja nacionalnaja konferencija
po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-
2014: trudy konferencii.* T.3.– Kazan. 2014. pp. 359–365.
5. Loktionova O.G. Issledovanie dvizhenija prygajushhego
robota, osnashhennogo kryljami s izmenjaemoj geometrijej / S.F. Ja-
cun, L.Ju. Vorochaeva, A.V. Vorochaev // *Chetyrnadcataja nacional-
naja konferencija po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym
uchastiem KII-2014: trudy konferencii.* T.3.– Kazan: Izd-vo RIC
«Shkola», 2014. pp. 307–314. Kazan, 2014, T. 3. pp. 307–314.
6. Jacun S.F. Issledovanie vlijanija tochki zakrepleniya kryla
na polet prygajushhego letajushhego robota / S.F. Jacun, L.Ju. Vo-
rochaeva, A.V. Vorochaev // *Jekstremalnaja robototehniki // Trudy
mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii.* Sankt-Peter-
burg: Izd-vo «Politehnika-servis», 2014. pp. 65–70.
7. Chernousko F.L. Optimalnoe upravlenie dvizheniem
mnogozvennoj sistemy v srede s soprotivleniem // *PMM.* 2012.
T. 76. Vyp. 3. pp. 355–373.

Рецензенты:

Локтионова О.Г., д.т.н., профессор,
проректор по учебной работе, ФГБОУ ВО
«Юго-Западный государственный универ-
ситет», г. Курск;

Кобелев Н.С., д.т.н., профессор, заведу-
ющий кафедрой теплогазоснабжения и вен-
тиляции, ФГБОУ ВО «Юго-Западный госу-
дарственный университет», г. Курск.