

УДК 621.865.8

С.Ф. Яцун, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

О.Г. Локтионова, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: rector@swsu.ru)

Л.Ю. Ворочаева, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: mila180888@yandex.ru)

О.В. Емельянова, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru)

КОНСТРУКЦИЯ И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА-ОРНИТОПТЕРА, ОСНАЩЕННОГО КРЫЛЬЯМИ И ХВОСТОМ

В работе рассматривается орнитооптер, полет которого имитирует полет птицы. Робот состоит из корпуса, двух складывающихся крыльев и хвоста. Крен орнитооптера обеспечивается взмахами крыльев, а тангаж и рысканье - поворотами хвоста в двух плоскостях. При переходе к расчетной схеме устройства каждое крыло заменяется двумя звеньями, соединенными между собой и с корпусом при помощи цилиндрических шарниров, оси всех шарниров параллельны продольной оси робота. Для осуществления взмахов в устройстве используются два механизма. Один из них (механизм взмахов) непосредственно обеспечивает колебания крыльев относительно корпуса, а также изменение их площади за счет сложения при движении вверх и разложения при движении вниз. Данный механизм состоит из двигателя и кривошипно-шатунно-коромыслового механизма. Второй механизм (поворота элеронов на крыльях) позволяет крыльям помимо взмахов дополнительно изгибаться во время движения, тем самым обеспечивая "загребание" воздуха и дополнительное управление площадью крыльев: ее уменьшение при движении крыльев вверх и увеличение при движении крыльев вниз. Хвост связан с корпусом за счет сферического шарнира и двух кривошипно-шатунных механизмов. При помощи одного из механизмов хвост поворачивается относительно продольной оси корпуса в горизонтальной плоскости, а при помощи другого - в вертикальной.

Для данного робота предложена система управления полетом, обеспечивающая движение робота по заданной траектории. Система управления включает в себя блок управления и устройство управления (орнитооптер). Блок управления образован модулями задающих воздействий и расчета углов, а также компаратором и регулятором. Устройство управления включает в себя приводы, звенья (крылья и хвост) и корпуса робота. Управление осуществляется по шести обобщенным координатам, определяющим положение и ориентацию корпуса в пространстве. Для этого используется восемь обратных связей по углам поворота крыльев и хвоста робота относительно его корпуса.

Ключевые слова: орнитооптер, крылья, хвост, сложение крыльев, разложение крыльев, элероны, система управления, обратная связь, структурная схема.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-18-26

Ссылка для цитирования: Конструкция и система управления робота-орнитооптера, оснащенного крыльями и хвостом / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, Л.Ю. Ворочаева, О.В. Емельянова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 18-26.

Введение

Орнитооптер представляет собой летательный аппарат, крылья которого выполнены машущими с имитацией движения крыльев птицы или крыльев насекомого. В последние годы особое внимание уделяется малогабаритным орнитоопте-

рам. Данные аппараты обладают рядом преимуществ: маленькая масса, компактность и маневренность, что позволяет расширить возможности их применения для мониторинга окружающей среды и в чрезвычайных ситуациях, в недоступных для человека местах, например в зонах с радиацией.

Разработки и исследования в области создания орнитоптеров и их применения в качестве устройств, осуществляющих мониторинг местности и участвующих в разведывательных мероприятиях, ведутся в настоящее время как российскими, так и зарубежными учеными. Описанные в работах [1-14] орнитоптеры различаются по числу звеньев, образующих крылья, числу степеней подвижности крыльев, виду шарниров, установленных между крыльями и корпусом и между звеньями крыльев, законам движения крыльев в полете и т.д. Также можно говорить и об разделении орнитоптеров на различные группы в зависимости от того, какому биологическому объекту он соответствует: птице [5-9] или насекомому [10-12]. Эти группы отличаются по размерам роботов, форме крыльев, их жесткости, совершаемым крыльями движениям, а также их амплитудам, частоте, деформациям и т.д. Часто в орнитоптерах, имитирующих птиц, предусмотрен хвост, который выполняет функцию стабилизатора полета [13, 14].

В данной работе предложена конструкция робота-орнитоптера, оснащенного складывающимися крыльями и хвостом, полет которого имитирует полет птицы. Предложена конструкция устройства, описаны его основные узлы: механизм, посредством которого осуществляются взмахи крыльями, механизм поворота элеронов на крыльях во время взмахов, а также механизм поворот хвоста. Представлена работа системы управления роботом, обеспечивающая его полет по заданной траектории.

Описание робота-орнитоптера

На рисунке 1 представлена конструкция робота-орнитоптера, движение которого будем рассматривать в абсолютной системе координат $OXYZ$.

Устройство состоит из корпуса 1 и двух крыльев, каждое из которых образовано двумя звеньями (звенья 2 и 3 составляют правое крыло, а звенья 4 и 5 – левое). Центр масс корпуса располагается в точке O_1 , с которой связана относительная система координат $O_1X_1Y_1Z_1$, углы поворота осей которой: крен φ , тангаж θ и рысканье ψ , определяют ориентацию орнитоптера в пространстве. Звенья крыльев соединены между собой и с корпусом при помощи цилиндрических шарниров $O_2 - O_5$, обеспечивающих их повороты на относительные углы φ_{12} , φ_{23} , φ_{34} , φ_{45} . На звеньях 3 и 5 крыльев расположены элероны 6 и 7, которые поворачиваются относительно звеньев 3 и 5 на углы α_6 и α_7 таким образом, что оси их вращения перпендикулярны осям поворота звеньев крыльев. Поворот элеронов обеспечивается за счет цилиндрических шарниров O_6 и O_7 . Этот поворот позволяет крыльям "загрести" воздух во время взмахов за счет их дополнительного изгиба, а также более рационально изменять площадь: при взмахе вверх она дополнительно уменьшается, а при взмахе вниз – увеличивается. С корпусом при помощи шарнира O_8 связан хвост 8, который может поворачиваться относительно двух взаимно перпендикулярных осей на углы β и γ . Хвост в данной конструкции робота выполняет функцию руля и стабилизатора полета.

Поворот орнитоптера вокруг продольной оси (крен) обеспечивается работой элеронов, при этом у робота одно крыло опускается, а другое поднимается. Поворот робота относительно поперечной и вертикальной оси (рысканье и тангаж) возможны за счет работы хвоста. В первом случае орнитоптер поднимает или опускает нос корпуса, а во втором – поворачивается влево или вправо.

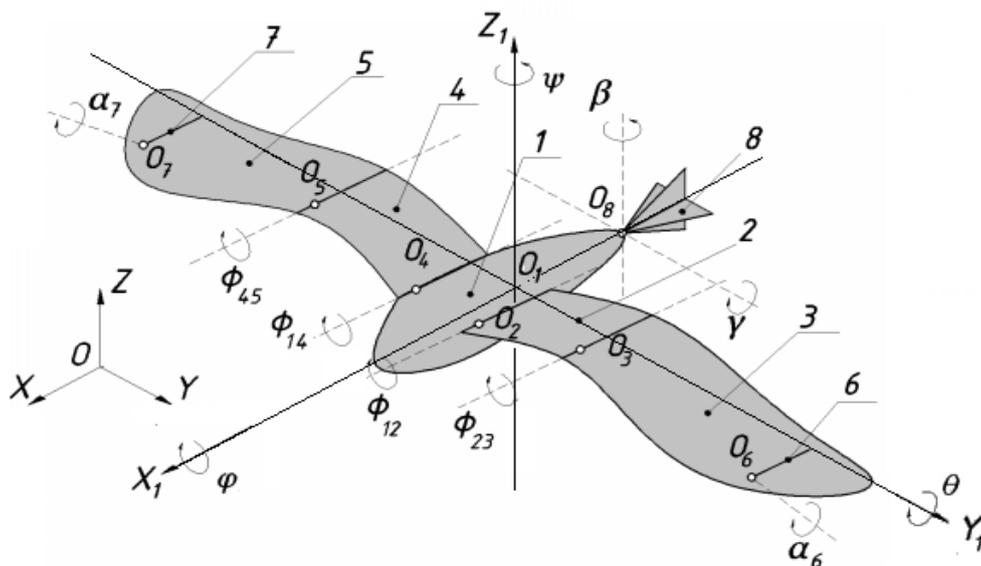


Рис. 1. Расчетная схема робота-орнитоптера: 1 – корпус, 2 – 5 – звенья крыльев, 6, 7 – элероны, 8 – хвост

Конструкция робота-орнитоптера

Рассмотрим более детально конструкцию основных узлов робота: механизмов взмахов крыльев, поворота хвоста и поворота элеронов.

Механизм, обеспечивающий взмах каждого крыла орнитоптера, является кривошипно-шатунно-коромысловым и показан на рис. 2. Механизм состоит из двигателя 9, установленного на корпусе робота, двух зубчатых колес 10 и 11, причем последнее выполняет функцию кривошипа, шатуна 12, коромысла 13 и стержня 14. Вращение выходного вала двигателя 9 передается на колесо 10 и за счет зубчатого зацепления на колесо 11 (кривошип). Кривошип 11 связан цилиндрическим шарниром 15 с шатуном 12, который в свою очередь соединен цилиндрическим шарниром 16 с коромыслом 13, выполненным в виде параллелограмма и соответствующим звену 2 крыла. Это означает, что данное звено крыла может поворачиваться вверх/вниз отно-

сительно продольной оси корпуса робота в некотором диапазоне углов, определяющемся длинами звеньев рассматриваемого механизма. Коромысло 13 соединяется со стержнем 14, соответствующим звену 3 крыла, цилиндрическим шарниром 17, стержень 14 совершает аналогичные коромыслу 13 движения, но в другом диапазоне углов.

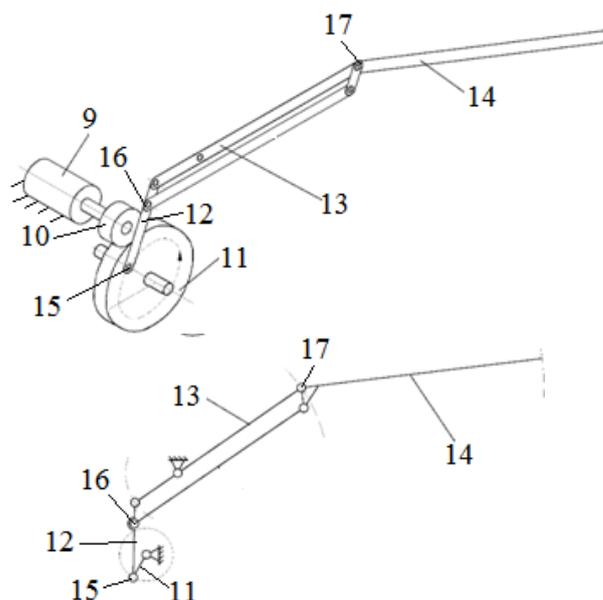


Рис. 2. Механизм взмаха крыла

Перейдем к рассмотрению конструкции узла, обеспечивающего поворот хвоста орнитоптера (рис. 3).

Хвост 8 имеет конусообразную форму, внутри конуса неподвижно располагается продольная ось 18, зафиксированная в хвосте при помощи кольца 19 с четырьмя распорами 20. Хвост 8 соединен с корпусом робота при помощи сферического шарнира 21 и двух кривошипно-шатунных механизмов. Сферический шарнир соединяет продольную ось хвоста с центральной осью 22 корпуса. Каждый кривошипно-шатунный механизм состоит из закрепленного на корпусе

электродвигателя 23, установленного на его валу кривошипа 24 и шатуна 25, соединяющего кривошип и один из распоров 20 кольца 19. В кривошипно-шатунном механизме используются цилиндрические шарниры 26 – 28.

Механизм поворота элеронов, установленных на звеньях 3 и 5 крыльев орнитоптера, показан на рис. 4. Элероны 29 закреплены на оси 30, которая соединена с валом электропривода 31. При повороте вала привода ось и элероны также поворачиваются относительно шарнира 17, соединяющего звенья крыла 3 и 2.

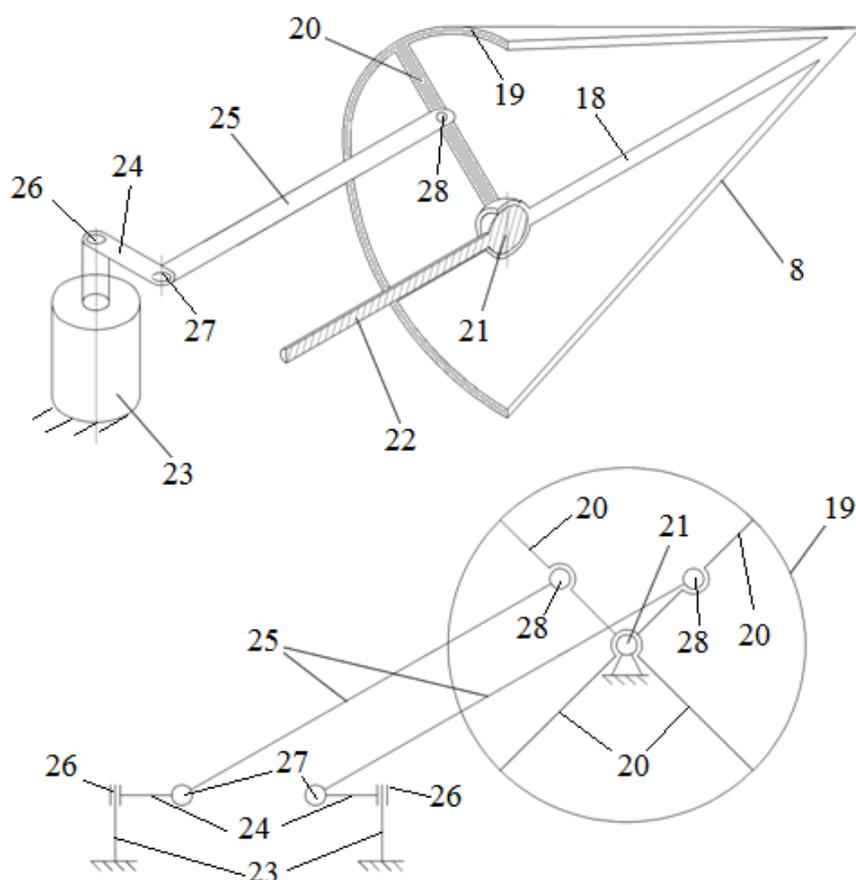


Рис. 3. Механизм поворота хвоста

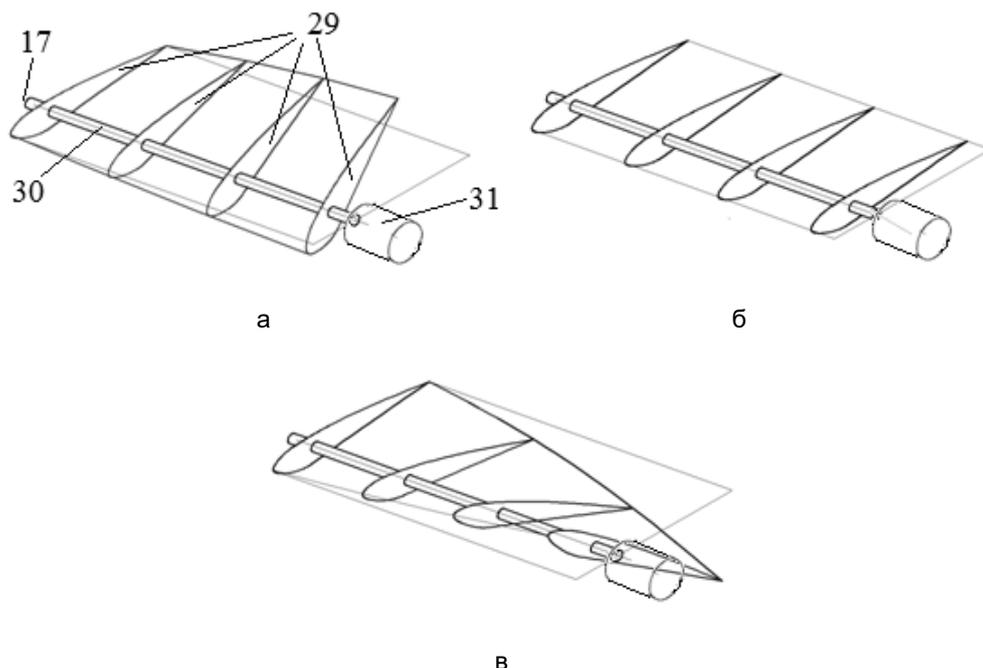


Рис. 4. Механизм поворота элеронов: а – при взмахе крыльев вниз, б – при горизонтальном положении крыльев, в – при взмахе крыльев вверх

Система управления роботом-орнитоптером

Вектор обобщенных координат рассматриваемого робота-орнитоптера включает в себя: три координаты центра масс корпуса X, Y, Z , три угла ориентации корпуса φ, θ, ψ , четыре относительных угла, определяющих повороты звеньев крыльев $\phi_{12}, \phi_{23}, \phi_{14}, \phi_{45}$, два угла поворота элеронов α_6 и α_7 , а также два угла поворота хвоста устройства β и γ . Вектор обобщенных координат можно представить следующим образом:

$$\mathbf{q} = (X \ Y \ Z \ \varphi \ \theta \ \psi \ \phi_{12} \ \phi_{23} \ \phi_{14} \ \phi_{45} \ \alpha_6 \ \alpha_7 \ \beta \ \gamma)^T. \quad (1)$$

Структурная схема системы управления роботом-орнитоптером приведена на рис. 5 и состоит из двух блоков: блока управления и объекта управления. Блок управления включает в себя модули, формирующие управляющие напряжения: модуль задающих воздействий, мо-

дуль расчета углов, компаратор и регулятор. Устройство управления – это непосредственно орнитоптер, в нем выделены необходимые для понимания процессов управления модули: приводы, звенья и корпус.

Модуль задающих воздействий генерирует необходимые значения координат X^*, Y^*, Z^* центра масс корпуса робота и углов $\varphi^*, \theta^*, \psi^*$, определяющих его ориентацию в пространстве. Эти данные поступают в модуль расчета углов, где, исходя из значений задающих воздействий определяются требуемые значения углов поворота звеньев крыльев $\phi_{12}^*, \phi_{23}^*, \phi_{14}^*, \phi_{45}^*$, элеронов α_6^*, α_7^* и хвоста β^*, γ^* . Вычисленные углы передаются на компаратор, туда же поступают сигналы фактических углов поворота $\phi_{12}, \phi_{23}, \phi_{14}, \phi_{45}, \alpha_6, \alpha_7, \beta, \gamma$ тех же звеньев, определенные датчиками обратной связи (датчики на схеме не показаны).

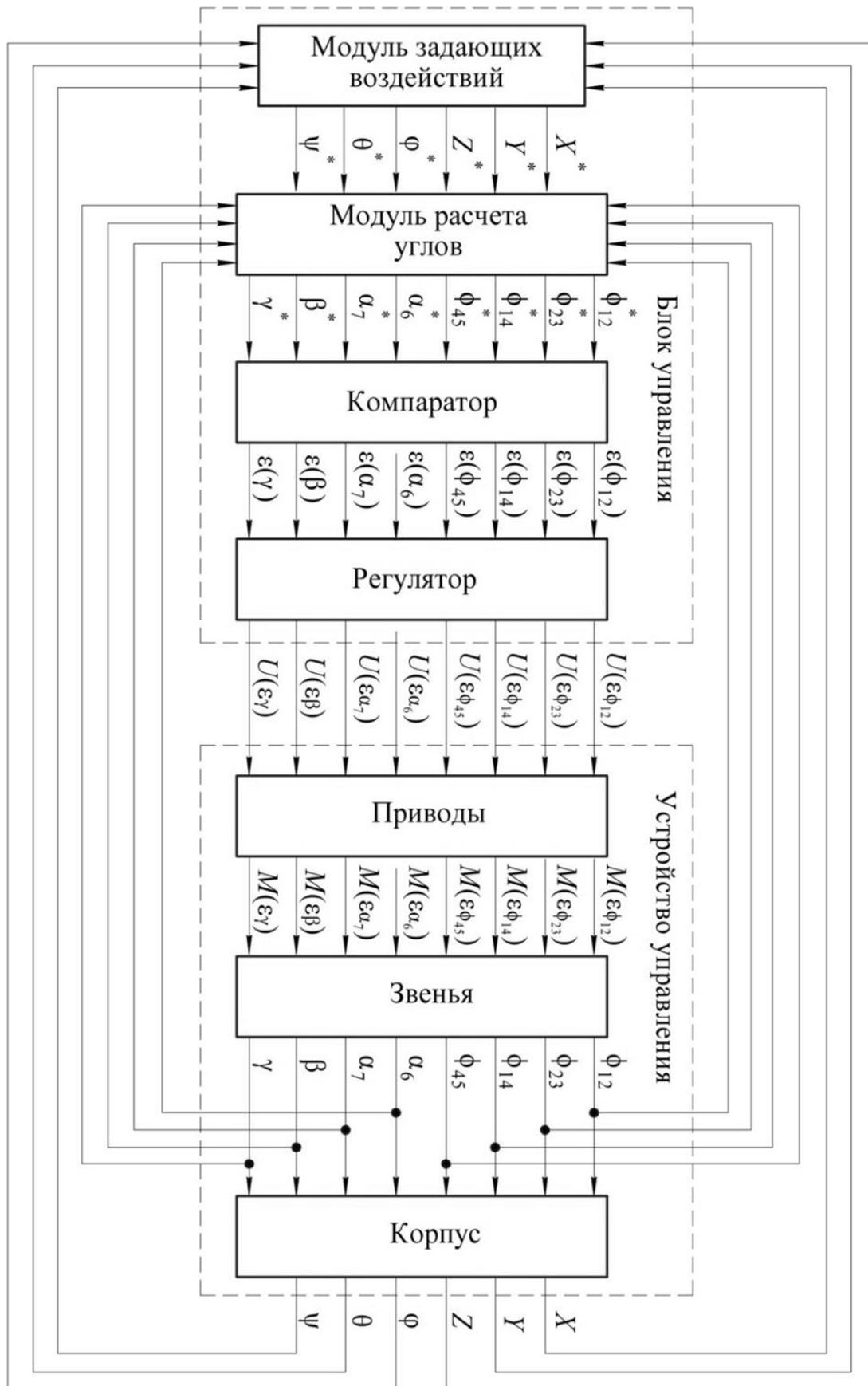


Рис. 5. Структурная схема системы управления роботом-орнитоптером

В компараторе происходит вычисление ошибок рассогласования требуемых и фактических сигналов углов. Формула для вычисления ошибки приведена для угла ϕ_{12} и справедлива для всех остальных параметров:

$$\varepsilon(\phi_{12}) = \phi_{12}^* - \phi_{12}. \quad (2)$$

Эти ошибки передаются на регулятор, который генерирует напряжения, поступающие на приводы орнитоопера:

$$U(\varepsilon_{\phi_{12}}) = f(\varepsilon(\phi_{12})). \quad (3)$$

Приводы, в свою очередь, формируют моменты

$$M(\varepsilon_{\phi_{12}}) = f(U(\varepsilon_{\phi_{12}})), \quad (4)$$

поступающие на звенья устройства и обеспечивающие их повороты на фактические углы ϕ_{12} , ϕ_{23} , ϕ_{14} , ϕ_{45} , α_6 , α_7 , β , γ .

За счет этого происходит изменение координат центра масс корпуса орнитоопера и его ориентации в пространстве, их фактические значения измеряются соответствующими датчиками, также не представленными на схеме, и поступают в модуль задающих воздействий.

Заключение

В работе рассматривается робот-орнитооптер, состоящий из корпуса, крыльев и хвоста, полет которого имитирует полет птицы. Представлено детальное описание конструкции аппарата, выделены три основных узла: механизм взмахов крыльев, механизм поворота элеронов на крыльях и механизм поворота хвоста. Помимо этого осуществлен переход к расчетной схеме устройства, введены соответствующие допущения, определены обобщенные координаты, посредством которых описывается положение робота в пространстве. Предложена система управления орнитооптером, обеспечивающая его полет по заданной траектории и со-

стоящая из двух основных модулей; блока управления и непосредственно объекта управления (орнитоопера). Приведена структурная схема системы управления, в которой задающими воздействиями являются обобщенные координаты, определяющие положение и ориентацию корпуса робота в пространстве. Для достижения требуемых значений этих координат используется управление с обратными связями по восьми каналам (углам поворота звеньев робота).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00787.

Список литературы

1. DeLaurier J.D. An ornithopter wing design // Canadian aeronautics and space journal. 1994. Vol. 40. N 1. P. 10-18.
2. Brooks A.N. Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur // AIAA. 1985. Pp. 85-1446.
3. Craparo E., Ingram B. A micro-sized ornithopter wing design // 41st aerospace sciences meeting and exhibit. 2003. Pp. 1-9.
4. 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.
5. Wissa A.A., Tummala Y., Hubbard J.E., Frecker M.I. Passively morphing ornithopter wings constructed using a novel compliant spine: design and testing. Smart Materials and Structures. 2012. Vol. 21. N 9, P. 1-9.
6. Roget B., Sitaraman J., Harmon R., Grauer J., Hubbard J., Humbert S. Computational Study of Flexible Wing Ornithopter Flight. J. of Aircraft. 2009. Vol. 46. N 6. P. 2016-2031.
7. Malik M.A., Ahmad F. Effect of Different Design Parameters On Lift, Thrust and Drag of an Ornithopter. Proc. of the

World Congress on Engineering. London, U.K. 2010. Vol. II. Pp. 1460-1465.

8. Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Ефимов С.В. Режимы движения орнитоптера со складывающимися крыльями // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. 2016. № 4(21). С. 141-150.

9. Ворочаева Л.Ю., Ефимов С.В., Локтионова О.Г., Лушников Б.В., Яцун С.Ф. Моделирование движения летательного аппарата с машущим крылом // Cloud of Science. 2016. Т. 3. № 4. С. 603-616.

10. X. Deng, L. Schenato, S. Sastry. Model identification and attitude control scheme for a micromechanical flying insect // International Conference Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Singapore. 2002. P. 1-6.

11. Fuller S.B. Karpelson M., Censi A., Ma K.Y., Wood R.J. Controlling free flight

of a robotic fly using an onboard vision sensor inspired by insect ocelli // J. Soc. Interface. 2014. 11(97). Pp. 1-14.

12. Fuller S.B., Helbling E.F., Chiraratananon P., Wood R.J. Using a MEMS gyroscope to stabilize the attitude of a fly-sized hovering robot // IMAV 2014: International Micro Air Vehicle Conference and Competition. 2014. Pp. 1-8.

13. Baek S.S., Garcia Bermudez F.L., Fearing R.S. Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter // Intelligent Robots and System, San Francisco, CA, USA. 2011. Pp. 1-8.

14. Grauer J.A., Hubbard J.E. Multi-body Model of an Ornithopter // J. of Guidance, Control, and Dynamics. 2009. Vol. 32. N. 5. Pp. 1675-1679.

Поступила в редакцию 26.02.18

UDC 621.865.8

S.F. Jatsun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

O.G. Loktionova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: rector@swsu.ru)

L.Yu. Vorochaeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: mila180888@yandex.ru)

O.V. Emelianova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru)

DESIGN AND CONTROL SYSTEM OF THE ROBOT ORNITHOPTER, EQUIPPED WITH WINGS AND TAIL

The paper deals with the ornithopter flight which simulates the flight of a bird. The robot consists of a body, two folding wings and a tail. The ornithopter roll is provided by wing swings, and pitch and yaw are provided by twists of the tail in two planes. When switching to the design scheme of the device, each wing is replaced by two links connected to each other and to the body by means of cylindrical hinges, the axes of all hinges are parallel to the longitudinal axis of the robot. Two mechanisms are used to implement swings in the device. One of them (the mechanism of swings) directly provides fluctuations in the wings relative to the body, as well as changing their area by adding when moving up and decomposition when moving down. This mechanism consists of a motor and crank-rod-rocker mechanism. The second mechanism (rotation of the ailerons on the wings) allows the wings in addition to flapping additionally to flex during motion, thereby "pocketing" of the air and the extra control area of the wings: its decrease with the movement of the wings up and the increase in the movement of the wings down. The tail is connected to the body due to the spherical hinge and two crank mechanisms. With the help of one of the mechanisms the tail rotates relative to the longitudinal axis of the body in the horizontal plane, and with the help of the other - in the vertical.

For this robot a flight control system is proposed, which provides the robot movement along a given trajectory. The control system includes a control unit and a control device (ornithopter). The control unit is formed by modules specifying the effects and calculation of angles, as well as comparator and controller. The control device includes drives, links (wings and tail) and the robot body. Management is carried out on six generalized coordinates determining the position and orientation of the hull in space. For this purpose, eight feedbacks are used in the angles of rotation of the wings and the tail of the robot relative to its body.

Key words: *ornithopter, wings, tail, add of wings, expansion of wings, ailerons, control system, feedback, block diagram.*

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-18-26

For citation: Jatsun S.F., Loktionova O.G., Vorochaeva L.Yu., Emelianova O.V. Design and Control System of the Robot Ornithopter, Equipped with Wings and Tail. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 18-26 (in Russ.).

Reference

1. DeLaurier J.D. An ornithopter wing design. Canadian aeronautics and space journal, 1994, vol. 40, no. 1, pp. 10–18.
2. Brooks A.N. Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur. AIAA, 1985, pp. 85-1446.
3. Craparo E., Ingram B. A micro-sized ornithopter wing design. 41st aerospace sciences meeting and exhibit, 2003, pp. 1-9.
4. 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.
5. Wissa A.A., Tummala Y., Hubbard J.E., M.I. Frecker Passively morphing ornithopter wings constructed using a novel compliant spine: design and testing. Smart Materials and Structures, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 1-9.
6. Roget B., Sitaraman J., Harmon R., Grauer J., Hubbard J., Humbert S. Computational Study of Flexible Wing Ornithopter Flight. J. of Aircraft. 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2016-2031.
7. Malik M.A., Ahmad F. Effect of Different Design Parameters On Lift, Thrust and Drag of an Ornithopter. Proc. of the World Congress on Engineering. London, U.K, 2010, vol. II, pp. 1460-1465.
8. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Efimov S.V. Modes of motion of the ornithopter with folding wings. J. Proceedings of the South-West State University. Series Engineering and Technology, 2016, no. 4(21), pp. 141-150.
9. Vorochaeva L.Yu., Efimov S.V., Loktionova O.G., Lushnikov B.V., Jatsun S.F. Modeling the movement of an aircraft with a flapping wing. Cloud of Science, 2016, 3 (4), pp. 603-616.
10. Deng X., Schenato L., Sastry S. Model identification and attitude control scheme for a micromechanical flying insect. International Conference Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Singapore, 2002, pp. 1-6.
11. Fuller S.B., Karpelson M., Censi A., Ma K.Y., Wood R.J. Controlling free flight of a robotic fly using an onboard vision sensor inspired by insect ocelli. J. Soc. Interface, 2014, no. 11(97), pp. 1-14.
12. Fuller S.B., Helbling E.F., Chiraratananon P., Wood R.J. Using a MEMS gyroscope to stabilize the attitude of a fly-sized hovering robot. IMAV 2014: International Micro Air Vehicle Conference and Competition, 2014, pp. 1-8.
13. Baek S.S., Garcia Bermudez F.L., Fearing R.S. Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter. Intelligent Robots and System, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 1-8.
14. Grauer J.A., Hubbard J.E. Multi-body Model of an Ornithopter. J. of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, vol. 32, no. 5, pp. 1675-1679.