

## Раздел III. Комплексы с БЛА

УДК 681.51:004.7; 623.746.4-519

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-8796

**А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, А.А. Дьяченко, Е.А. Плаксиенко****АВТОНОМНОЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МИССИЙ БЛА\***

*В докладе рассматривается система управления полетом БЛА в процессе автономного выполнения им заданной миссии. Эта миссия может заключаться в мониторинге отдельных лесных массивов, морских и океанских акваторий; ледовой, химической и радиационной обстановки; аэросъемке заданных участков земной поверхности, патрулировании шоссейных дорог и государственных границ, доставке грузов и т.п. Так как на борту БЛА отсутствуют люди, то его движение по заданному для выполнения возложенной на него миссии маршруту должно осуществляться в автономном режиме. При этом траектория движения БЛА, как правило, является довольно сложной кривой. Поэтому разработанная система управления представляет собою трехканальный комплекс, предназначенный для независимого управления скоростью движения БЛА в продольном, поперечном направлениях и по курсу. Все системы комплекса спроектированы методом аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ). Они характеризуются заданными прямыми показателями качества, такими как порядки астатизма, перерегулирование, длительность переходных процессов и малая колебательность. С целью повышения робастности управляющего комплекса системы спроектированы как системы с согласованными полюсами. Отличительной особенностью систем управления является возможность оперативного, например, по заранее заданной программе или по командам оператора, изменять динамические свойства БЛА. Получены расчетные соотношения для автономного осуществления ряда маневров и полета БЛА по сложной траектории в процессе выполнения заданной миссии. Исследование свойств разработанного управляющего комплекса проведено путем компьютерного моделирования полетов БЛА в различных режимах. В результате моделирования установлено, что предложенный комплекс систем управления позволяет БЛА выполнять в автономном режиме все маневры, необходимые для полета БЛА на постоянной высоте по достаточно сложной заданной траектории, с требуемыми показателями качества. Представленные в статье результаты могут быть использованы при создании бортовых систем группового управления беспилотными летательными аппаратами, различного назначения и базирования.*

*Система управления, оперативное, изменение, динамика, расчетные соотношения, БЛА, автономная миссия, показатели качества, маневр, траектория.*

**A.R. Gaiduk, S.G. Kapustyan, A.A. Dyachenko, E.A. Plaksienko****AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM OF UAV MANEUVERS**

*In the report the control system for flight of an unmanned aerial vehicle (UAV), when it carries out required mission independently, is considered. This mission can consist in monitoring separate large forests and sea and ocean areas; icing, chemical and radiating conditions; to aerial photograph of the set sites of a terrestrial surface, patrolling of highways and frontiers, delivery of cargoes, etc. As onboard UAV there are no people its movement on the given route for performance of the mission assigned to it should be carried out in an autonomous mode. Thus the trajec-*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 16-29-04194, а также в рамках реализации Государственного задания на 2017 г. проект № 0256-2015-0079.

jectory of UAV movement, as a rule, is rather complex curve. Therefore the developed control system represents itself a three-channel complex for independent control of the UAV motion speed in longitudinal, cross-section directions and control of a course corner. All systems are created by the method of analytical design of systems with control on output and impacts (ADESYSCOI). They are characterized by the set direct of the quality performances, such as astatic orders, overshoot, duration of transients and small oscillation. With the purpose of increase robustness the systems were projected as system with the coordinated poles. Distinctive feature of control systems is the opportunity operative, for example, under the preset program or on commands of the operator, to change of the dynamic properties of the UAV. Settlement ratio for independent realization of some maneuvers and UAV flight on the desired trajectory are received. Research of the properties of the designed control complex is carried out by computer simulation of the UAV flights in various modes. As a result of the computer simulation of the suggested systems complex it is established, that the control system allows the UAV to carry out in an independent mode all the maneuvers necessary for flight of the UAV at the constant height on the desired, enough complex trajectory with required performances. The submitted results can be used at creation of the group onboard control systems of the unmanned aerial vehicles various purpose and basing.

Control system, operative, change, dynamic, settlement ratio, UAV, autonomous mission, performances, maneuver and trajectory.

**Введение.** В настоящее время во многих оборонной и гражданской сферах применяются беспилотные летательные аппараты (БЛА) для автономного выполнения ряда миссий. К этим миссиям относятся мониторинг отдельных лесных массивов и акваторий; мониторинг ледовой, химической и радиационной обстановки; аэросъемка заданных участков земной поверхности, и т.п. Эти задачи успешно решаются одиночным БЛА, если он способен в автономном режиме совершать полет по заданной траектории с достаточным качеством [1–5]. Так как БЛА является беспилотным, то возникает задача автономного управления (самоуправления) его полетом на заданной постоянной высоте, по определенной траектории. При этом требования к качеству соответствующей системы управления являются достаточно жесткими. Задачи управления автономными миссиями БЛА рассматривалась во многих работах, где были определены математические модели и рассмотрены различные подходы к построению систем автономного управления движениями БЛА [6–15]. Задача полета БЛА по траектории заданной рядом точек в наземной системе координат, рассмотрена в работах [12–16]. При выполнении своих миссий БЛА, как правило, должен совершать ряд маневров: поворот на заданный угол, переход на траекторию параллельную предыдущей; разворот для полета в противоположном направлении и др.

В данной работе рассматривается возможность автономного выполнения требуемых миссий БЛА под управлением специального трехканального комплекса управления [17–18]. Этот комплекс включает две системы независимого управления продольным и поперечным движением БЛА, а также систему управления его курсом. Эти системы разработаны методом аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействию (АССУВВ) на основе математической модели БЛА из работы [19], которая с достаточной точностью описывает горизонтальные движения БЛА.

**Постановка задачи.** Движения БЛА рассматриваются в двух системы координат: земной  $O_0(x_0, y_0, z_0)$ , начало которой помещается в некоторой точке на земле, и связанной  $O(x, y, z)$ , начало которой совмещено с центром тяжести БЛА. При этом ось  $Ox_0$  земной системы координат направлена на север, ось  $Oz_0$  – направлена вправо, а ось  $Oy_0$  – вертикально вверх. В качестве обобщенных координат приняты три координаты положения центра тяжести БЛА  $x_0, y_0, z_0$  в земной системе и три угла Эйлера:  $\psi$  – рыскание (курс),  $\vartheta$  – тангаж и  $\gamma$  – крен. При углах Эйлера  $\psi = 0$ ,  $\vartheta = 0$  и  $\gamma = 0$  – оси связанной системы параллельны одноименным осям земной системы координат [6, 18, 20]. Положительным направлением всех углов считается поворот против часовой стрелки.

Для большей общности далее приводится описание одиночного  $i$ -го БЛА, который входит в группу из  $N_{\text{БЛА}}$  аппаратов. При плоских, горизонтальных движениях на постоянной высоте полета всей группы БЛА, т.е. при  $y_{0i} = \text{const}$  и  $\gamma_i = 0$ , координаты  $i$ -го БЛА в земной системе координат  $x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}$  связаны с координатами в связанной системе следующими выражениями:

$$\dot{x}_{0i} = V_{xi} \cos \psi_i + V_{zi} \sin \psi_i, \quad \dot{y}_{0i} = V_{yi}, \quad \dot{z}_{0i} = V_{zi} \cos \psi_i - V_{xi} \sin \psi_i, \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}$ ;  $V_x, V_y, V_z$  – скорости изменения координат БЛА в связанной системе координат;  $N_{\text{БЛА}}$  – число БЛА в группе [9, 18].

**Уравнения динамики БЛА.** Как отмечалось выше, в работе приняты уравнения движений БЛА, предложенные в работе [19]. С учетом аэродинамических сил сопротивления и влияния ветра эти уравнения в связанной системе координат в отклонениях имеют вид

$$\dot{x}_i = v_{xi}, \quad \dot{v}_{xi} = \frac{b_{xi}}{m_i} u_{xi} - \frac{\beta_{xi}}{m_i} v_{xi}^2 - \frac{\zeta_{xi}}{m_i} V_{\text{вет}}^2 \cos(\psi_i - \psi_{\text{вет}}), \quad (2)$$

$$\dot{z}_i = v_{zi}, \quad \dot{v}_{zi} = \frac{b_{zi}}{m_i} u_{zi} - \frac{\beta_{zi}}{m_i} v_{zi}^2 - \frac{\zeta_{zi}}{m_i} V_{\text{вет}}^2 \sin(\psi_i - \psi_{\text{вет}}), \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_i = v_{\psi i}, \quad \dot{v}_{\psi i} = \frac{b_{\psi i}}{J_{yi}} u_{\psi i} - \frac{\beta_{\psi i}}{J_{yi}} v_{\psi i}^2 + \frac{\zeta_{\psi i}}{J_{yi}} V_{\text{вет}}^2 \sin(\psi_i - \psi_{\text{вет}}), \quad (4)$$

где  $x_i = x_i(t)$ ,  $z_i = z_i(t)$ ,  $v_{xi} = v_{xi}(t)$ ,  $v_{zi} = v_{zi}(t)$  – отклонения координат и скоростей  $i$ -го БЛА по соответствующим осям координат;  $u_{xi} = u_{xi}(t)$ ,  $u_{zi} = u_{zi}(t)$  – управления по продольной  $x_i$  и поперечной  $z_i$  осям, соответственно;  $u_{\psi i}$  – управление курсом;  $m_i$  – масса, а  $b_{xi}$ ,  $\beta_{xi}$ ,  $b_{zi}$ ,  $\beta_{zi}$ ,  $b_{\psi i}$ ,  $\beta_{\psi i}$ ,  $\zeta_{xi}$ ,  $\zeta_{zi}$ ,  $\zeta_{\psi i}$  – коэффициенты  $i$ -го БЛА;  $J_{yi}$  – момент инерции относительно вертикальной оси;  $V_{\text{вет}}$ ,  $\psi_{\text{вет}}$  – скорость и направление ветра в земной системе координат. Начальные условия:  $x_{i0} = 0$  м,  $z_{i0} \neq 0$  м,  $z_{j0} \neq z_{j0}$ ,  $\psi_{0i} = 0$ ,  $i \neq j$ ;  $v_{xi0} = v_{x0} \neq 0$  м/с,  $v_{zi0} = v_{\psi i0} = 0$ ,  $i, j = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}$ . Координаты  $x_i$ ,  $z_i$ , и  $\psi_i$  являются управляемыми переменными  $i$ -го БЛА,

**Устройства управления БЛА. Продольное и поперечное движение.** При движении в установившемся режиме с постоянной скоростью  $V_{xi}$  вдоль оси  $OX$  всех БЛА группы, выходные переменные  $x_i = x_i(t)$  их систем управления по каналам  $g_{xi} \rightarrow x_i$  являются линейными функциями времени, т.е.  $g_{xi}(t) = V_{xi}(t - t_0) + x_{i0}$ . Поддержание заданной скорости и заданного расстояния между отдельными БЛА, обеспечивается устройством управления, уравнения которого имеют вид:

$$\dot{w}_{xi1} = -\frac{2347,2}{(t_{p,xi}^*)^2} w_{xi2} + \frac{20736 m_i}{b_{xi} (t_{p,xi}^*)^4} \varepsilon_{xi}, \quad (5)$$

$$\dot{w}_{xi2} = w_{xi1} - \frac{86,4}{t_{p,xi}^*} w_{xi2} + \frac{20390,4 m_i}{b_{xi} (t_{p,xi}^*)^3} \varepsilon_{xi}, \quad u_{xi} = w_{xi2}. \quad (6)$$

Здесь  $\varepsilon_i = g_{xi} - x_i$ ,  $i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}$ ;  $g_{xi}^*$  – задающее воздействие системы управления продольным движением БЛА [6, 10].

Уравнения устройства управления поперечным движением БЛА, полученные тем же методом АССУВВ, что и уравнения (5), (6), но при условии, что обеспечивается астатизм первого порядка, имеют следующий вид:

$$\dot{w}_{zi} = -\frac{18,93}{t_{p,zi}^*} w_{zi} + \frac{251,24m_i}{b_{zi}(t_{p,zi}^*)^3} g_{zi}^* + \frac{2009,95m_i}{b_{zi}(t_{p,zi}^*)^3} z_i, \quad (7)$$

$$u_{zi} = w_{zi} - \frac{119,45m_i}{b_{zi}(t_{p,zi}^*)^2} z_i, \quad i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}, \quad (8)$$

где  $g_{zi}^*$  – задающее воздействие по каналу  $g_{zi} \rightarrow z_i$   $i$ -го БЛА [18].

**Управление курсом БЛА.** Устройство управления курсом БЛА также получено методом АССУВВ при тех же требованиях к замкнутому контуру управления, что и в случае управления поперечным движением.

В предположении, что в процессе полета по заданной траектории БЛА несколько раз изменяет направление, уравнения УУ курсом записываются в виде

$$\dot{w}_{\psi i} = -\frac{18,93}{t_{p,\psi i}^*} (w_{\psi i} - w_{\psi i0}) + \frac{251,24J_{yi}}{b_{\psi i}(t_{p,\psi i}^*)^3} g_{\psi i}^* + \frac{2009,95J_{yi}}{b_{\psi i}(t_{p,\psi i}^*)^3} (\psi_i - \psi_{i0}), \quad (9)$$

$$u_{\psi i} = (w_{\psi i} - w_{\psi i0}) - \frac{119,45J_{yi}}{b_{\psi i}(t_{p,\psi i}^*)^2} (\psi_i - \psi_{i0}), \quad (10)$$

где  $w_{\psi i0}$ ,  $\psi_{i0}$  – значения, которые переменные имеют в конце предыдущего режима полета  $i$ -го БЛА,  $i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}$ . Изменение направления полета БЛА, т.е. изменение режима полета, осуществляется путем изменения в заданной точке траектории значения курса  $g_{\psi i}^*$  в уравнении (9).

Исследование системы управления курсом осуществлялось путем моделирования в MATLAB. На рис. 1 приведены отрезки траекторий движения  $i$ -го БЛА при выполнении им поворотов: на угол  $g_{\psi i}^* = -\pi/2$  в заданной точке ( $x = 225$ ;  $z = 0$ ) и на угол  $g_{\psi i}^* = \pi/4$  в точке ( $x = 50$ ;  $z = 0$ ).

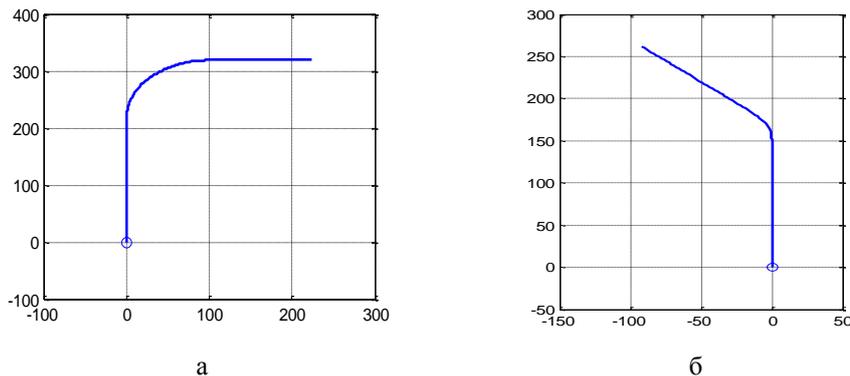


Рис. 1. Повороты  $i$ -го БЛА: а – на  $-\pi/2$ ; б – на  $+\pi/4$

Наиболее сложным маневром является разворот БЛА для полета в противоположном направлении по траектории, отстоящей на заданном расстоянии от траектории движения до разворота. Рассмотрим подробнее расчет задающих воздействий по каналам САУ для выполнения данного маневра.

**Разворот БЛА.** При постоянных скоростях продольного и углового движений  $V_{xi} = const \neq 0$  и  $v_{\psi i} = const \neq 0$ , а также нулевой скорости поперечного движения  $V_{zi} = 0$ , из выражений (1) вытекают следующие соотношения для текущих координат  $i$ -го БЛА в наземной системе координат:

$$x_{0i}(t_{\pi i}) = x_{0i}(t_0) + V_{xi} [\sin(\psi_{0i} + v_{\psi i} t_{\pi i}) - \sin(\psi_{0i} + v_{\psi i} t_0)] / v_{\psi i}, \quad (11)$$

$$z_{0i}(t_{\pi i}) = z_{0i}(t_0) + V_{xi} [\cos(\psi_{0i} + v_{\psi i} t_{\pi i}) - \cos(\psi_{0i} + v_{\psi i} t_0)] / v_{\psi i}. \quad (12)$$

Приведем ряд численных примеров.

**Пример 1.** Пусть  $\psi_{0i} = 0$ ,  $x_{0i} = 120$ ,  $z_{0i} = 0$ ,  $t_{0i} = 0$ .  $V_{xi} = const$ , а  $V_{zi} = 0$  и  $v_{\psi i} = -\pi/t_{\pi i}$ . Построить траекторию полета  $i$ -го БЛА в соответствии с заданными значениями и оценить параметры разворота.

Предварительно, по выражениям (11), (12) найдем уравнения траектории движения БЛА, которые описывают изменения координат  $i$ -го БЛА в наземной системе координат. Подставляя заданные численные значения в указанные выражения, получим формулы, которые позволяют определить параметры траектории полета  $i$ -го БЛА при  $t = t_{\pi i} / 2$  и при  $t = t_{\pi i}$  после разворота:

$$x_{0i}(t_{\pi i} / 2) = 120 + V_{xi} t_{\pi i} / \pi,$$

$$x_{0i}(t_{\pi i}) = 120, \quad z_{0i}(t_{\pi i}) = 2V_{xi} t_{\pi i} / \pi. \quad (13)$$

Пусть скорость продольного движения БЛА  $V_{xi} = 25$  м/с, и траектория полета в обратном направлении должна отстоять на  $\Delta_{si}^* = 200$  м правее от траектории полета в предыдущем направлении.

Так как в данном случае  $z_0 = 0$ , то значение  $z_{0i}(t_{\pi i})$  равно смещению траектории полета БЛА в поперечном направлении. Поэтому из второй формулы (13), полагая  $z_{0i}(t_{\pi i}) = \Delta_{si}^* = 200$ , получим выражения:  $t_{\pi i}^* = \Delta_{si}^* \pi / 2V_{xi}$ ,  $v_{\psi i} = -\pi / 2t_{\pi i}^*$ .

Подставляя численные значения в эти выражения и в формулы (13), найдем  $t_{\pi i}^* = 200\pi / 50 = 12,56$  с;  $v_{\psi i} = -\pi / 12,56 = 0,25$  рад/с;  $x_{0i}(12,56) = 120$  м;  $x_{0i}(t_{\pi i}^* / 2) = 120 + 25 \cdot 12,56 / 3,14 = 220$ ;  $z_{0i}(t_{\pi i}) = 2 \cdot 25 \cdot 12,56 / 3,14 = 200$ .

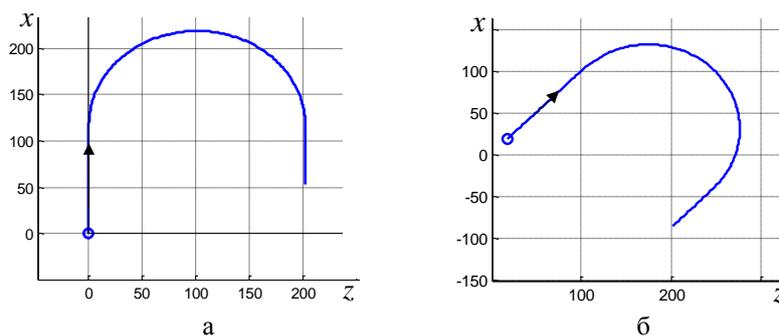


Рис. 2. Развороты  $i$ -го БЛА на  $-\pi/2$  (вправо)

Проекция на поверхность Земли, соответствующей траектории  $i$ -го БЛА, полученная в MATLAB, показана на рис. 2,а. В данном случае траектории БЛА до и после разворота параллельны оси  $OZ$ , поэтому координаты БЛА при  $t_{\pi i}^* / 2$  и  $t_{\pi i}^*$ , а

также смещение БЛА вдоль оси  $OZ$  легко определяются по проекции траектории, приведенной на рис. 2,а. Как видно, реальное смещение  $\Delta_{si} \approx 201 \div 202$  м, т.е. несколько больше расчетного значения. Это объясняется тем, что вначале и в конце разворота в САУ протекает переходный процесс, вызванный изменением заданного закона изменения угла  $\psi$ .

Из выражений (11)–(13) и полученных выше численных результатов следует, что, при заданном смещении  $\Delta_{si}^*$  требуемую длительность разворота и скорость изменения курсового угла, практически можно определять по выражениям:

$$t_{\psi i}^* = \frac{\Delta_{si}^* \pi}{2V_{xi}}, \quad v_{\psi i} = \begin{cases} -\pi/t_{\psi i}^*, & \text{разворот вправо,} \\ \pi/t_{\psi i}^*, & \text{разворот влево.} \end{cases} \quad (14)$$

Эти выражения, как видно из предыдущего примера, выполняются при начальном значении угла  $\psi_{0i} = 0$ . Покажем на численном примере, что полученные соотношения (14) справедливы и при начальном значении угла  $\psi_{0i} \neq 0$ .

**Пример 2.** Пусть  $\psi_{0i} = -45^\circ = -\pi/4$ ,  $x_{0i} = 20$ ,  $z_{0i} = 20$ ,  $t_{0i} = 0$ ,  $V_{xi} = 25$ ,  $V_{zi} = 0$ . Найти расчетные значения параметров разворота  $i$ -го БЛА вправо со смещением на 240 метров траектории полета в противоположном направлении и сравнить со смещением траектории полета  $i$ -го БЛА, полученной путем компьютерного моделирования.

По формулам (14) получаем те же значения, что и в предыдущем случае:  $t_{\psi i}^* = 12,56$  с,  $v_{\psi i} = -0,25$  рад/с. Подставляя найденные значения в формулы (11), (12), получим:  $x_{0i}(t_{\psi i}) = -41,4$ ;  $z_{0i}(t_{\psi i}) = 241,4$ .

В результате моделирования данного случая в MATLAB получена проекция траектории движения  $i$ -го БЛА, показанная на рис. 2,б. Нетрудно установить непосредственно по этому рисунку, что полученная траектория полета БЛА достаточно точно соответствует расчетной. В частности, смещение траектории после разворота составляет 240,2 м, что достаточно точно соответствует заданному значению смещения в 240 м.

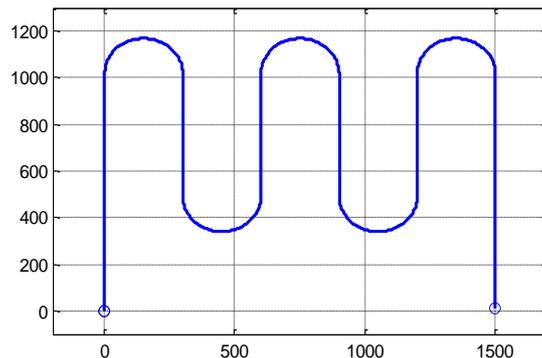


Рис. 3. Траектория БЛА в процессе мониторинга

В процессе мониторинга некоторой территории БЛА обычно совершает полет по параллельным траекториям в чередующихся направлениях [8, 15, 16, 21]. Пример такого рода траектории с заданным смещением в 300 м после каждого

разворота, полученной путем моделирования в MATLAB полета  $i$ -го БЛА под управлением разработанного комплекса, приведен на рис. 3. Координаты площади, подлежащей мониторингу лежат в пределах: по оси  $ox$  от 425 до 1000 м, а по оси  $oz$  от -150 м до 1650 м. Контролируемая площадь при прямолинейном полете БЛА в поперечном направлении: от -150 м до +150 м. Её центром является прямолинейный участок траектории движения самого БЛА.

Приведенная на рис. 3 траектория свидетельствует, что разработанный комплекс обеспечивает эффективное управление БЛА по выполнению ими заданных миссий в автономном режиме.

**Заключение.** Разработанная трехканальная система автономного управления полетом БЛА, разработанная с применением метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ), обеспечивает достаточно точное движение БЛА по заданным траекториям на постоянной высоте. Полученные выше соотношения позволяют рассчитать параметры разворота БЛА для движения в противоположном направлении по траектории, смещенной на заданное расстояние. Разработанный трехканальный комплекс управления обеспечивает автономное выполнение БЛА достаточно сложных миссий.

Результаты, полученные в данной работе, могут использоваться при разработке систем группового управления беспилотными летательными аппаратами. При этом возможно управление автономным выполнением заданных миссий как одиночными, так и группами БЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В.Б., Теряев Е.Д. Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете) // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 12-23.
2. Lozano R. Unmanned Aerial Vehicles. – John Wiley, 2010.
3. Абросимов В.К., Гончаренко В.И. Мониторинг объектов территорий группой интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Шестой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»: в 2 т. Т. I. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 14-23.
4. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шановалов И.О. Решение транспортной задачи группой роботов // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах (УТЭОСС-2012)». – СПб.: ГНЦ «ОАО ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С. 714-717.
5. Назарова А.В., Рыжкова Т.П. Система управления коллективом роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 4. – С. 45-50.
6. Гайдук А.Р. Управление группой БЛА с ограничением на управление и переменные состояния // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 2. – С. 52-57.
7. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.
8. Cannu J., Lin M. An opportunistic global path planner // Proc. of the IEEE International Conference on Robotic and Automation. – 1990. – P. 1554-1559.
9. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Сребрякова. – М.: Физматлит, 2009.
10. Гайдук А. Р., Капустян С.Г. Концептуальные аспекты группового применения беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 7. – С. 8-15.
11. Dogan A. Venkataramanan S. Nonlinear control for reconfiguration of Unmanned-Aerial-Vehicle Formation // J. of Guidance, control and dynamics. – 2005. – Vol. 28, No. 4. – P. 667-678.

12. Li X., Xie J., Cai M.Y., Xie M., Wang Z.K. Path planning for UAV based on improved heuristic A\* algorithm // Proceedings of International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing. Aug 16-19. 2009. – P. 3488-3493.
13. Пищикопов В.Х. Управление подвижными объектами в априори неформализованных средах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (104). – С. 6-9.
14. Анисимов В.Н., Кабанов С.А. Управление траекторией движения летательного аппарата при облете препятствий с применением методов аналитической механики // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 3. – С. 3-10.
15. Абрамов Н.С., Хачумов М.В. Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – № 9. – С. 9-22.
16. Wang Z.H., Zhang W.G., Shi J.P., Han Y. UAV route planning using multiobjective and colony system // Proceedings of IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent System, Chengdu, China. 2008. Sep 21-24. – P. 797-800.
17. Knoebel N.B., McLain T.W. Adaptive quaternion control of a miniature tail sitter UAV // American Control Conference. Westin Seattle Hotel. USA. 2008. – P. 2340-2345.
18. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Дьяченко А.А., Плаксиенко Е.А. Система автономного управления маневрами БЛА. Системный анализ, управление и обработка информации // Труды 7-го Международного семинара (Ростов-на-Дону, 6.10 – 12.10.2016 г.) / под общей ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2016. – С. 210-218.
19. Харьков В.П., Меркулов В.И. Синтез алгоритма иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 8. – С. 61-67.
20. Mc Cormick B.W. Aerodynamics aeronautics and flight mechanics. – John Wiley and Sons Inc, 1995.
21. Каршаков Е.В. Особенности алгоритмов управления летательным аппаратом при аэросъемке // Проблемы управления. – 2012. – № 3. – С. 71-76.

## REFERENCES

1. Sokolov V.B., Teryaev E.D. Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете) [Unmanned aerial vehicle: some questions of development and application (the review of publications in the Internet)], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2008, No. 2, pp. 12-23.
2. Lozano R. Unmanned Aerial Vehicles. John Wiley, 2010.
3. Abrosimov V.K., Goncharenko V.I. Monitoring ob"ektov territoriy gruppy ob"intellektual'nykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Monitoring of territory objects by fleet on the intellectual drones], *Materialy Desyatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i Shestoy molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Materials of the Tenth All-Russia scientific-practical conference «Perspective systems and problems of control» and the Sixth youth a school-seminar «Control and processing of the information in technical systems»]: in 2 vol. Vol. I. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 14-23.
4. Gayduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. Reshenie transportnoy zadachi gruppy robotov [Decision of a transport problem by group of robots], *Materialy konferentsii «Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh (UTEOSS-2012)»* [Materials of conference «Control in technical, argotic, organizational and network systems (UTAONWS-2012)»]. St. Petersburg: GNTs «OAO TsNII «Elektroprigor», 2012, pp. 714-717.
5. Nazarova A.V., Ryzhkova T.P. Sistema upravleniya kollektivom robotov [Control system collective of robots], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2014, No. 4, pp. 45-50.
6. Gayduk A.R. Upravlenie gruppy BЛА s ogranicheniem na upravlenie i peremennye sostoyaniya [Group BЛА control with restriction on the control action and the state variable], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2012, No. 2, pp. 52-57.
7. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sintez adaptivnykh sistem upravleniya letatel'nyimi apparatami [Synthes of adaptive control systems for flying devices], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 3 (104), pp. 187-196.

8. Canny J., Lin M. An opportunistic global path planner, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotic and Automation*, 1990, pp. 1554-1559.
9. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov [Modern information technologies in problems of navigation and prompting of the unmanned aerial vehicle], ed. by M.N. Krasil'shchikova, G.G. Srebryakova. Moscow: Fizmatlit, 2009.
10. Gayduk A. R., Kapustyan S.G. Kontseptual'nye aspekty gruppovogo primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Conceptual aspects of the group application of the unmanned aerial vehicle], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2012, No. 7, pp. 8-15.
11. Dogan A. Venkataramanan S. Nonlinear control for reconfiguration of Unmanned-Aerial-Vehicle Formation, *J. of Guidance, control and dynamics*, 2005, Vol. 28, No. 4, pp. 667-678.
12. Li X., Xie J., Cai M.Y., Xie M., Wang Z.K. Path planning for UAV based on improved heuristic A\* algorithm, *Proceedings of International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing. Aug 16-19. 2009*, pp. 3488-3493.
13. Pshikhopov V.Kh. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v apriori neformalizovannykh sredakh [Control of mobile objects in a priori not formalized environments], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (104), pp. 6-9.
14. Anisimov V.N., Kabanov S.A. Upravlenie traektoriy dvizheniya letatel'nogo apparata pri oblete prepyatstviy s primeneniem metodov analiticheskoy mekhaniki [Control of a trajectory of the flying device movement at flight of obstacles with application of the analytical mechanics methods], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2005, No. 3, pp. 3-10.
15. Abramov N.S., Khachumov M.V. Modelirovanie provodki po marshrutu bespilotnogo letatel'nogo apparata kak zadachi presledovaniya tseli [Modelling of posting on a route of the unmanned aerial vehicle, as tasks of the purpose prosecution], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrument making], 2013, No. 9, pp. 9-22.
16. Wang Z.H., Zhang W.G., Shi J.P., Han Y. UAV route planning using multiobjective and colony system, *Proceedings of IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent System, Chengdu, China. 2008. Sep 21-24*, pp. 797-800.
17. Knoebel N.B., McLain T.W. Adaptive quaternion control of a miniature tail sitter UAV, *American Control Conference. Westin Seattle Hotel. USA. 2008*, pp. 2340-2345.
18. Gayduk A. R., Kapustyan S.G., D'yachenko A.A., Plaksienko E.A. Sistema avtonomnogo upravleniya manevrami BLA. Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii [System of the autonomous control of UAV maneuvers], *Trudy 7-go Mezhdunarodnogo seminar (Rostov-na-Donu, 6.10–12.10.2016 g.)* [In works of 7-th International seminar «The system analysis, management and processing of the information» (Rostov-on-Don, 6.10–12.10.2016)], under common edition of R.A. Neyidorfa. Rostov-on-Don: DGTU, 2016, pp. 210-218.
19. Sintez algoritma ierarkhicheskogo upravleniya gruppoy BLA [Synthes of the hierarchical control algorithm of the UAV group], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2012, No. 8, pp. 61-67.
20. Mc Cormick B.W. Aerodynamics aeronautics and flight mechanics. John Wiley and Sons Inc, 1995.
21. Karshakov E.V. Osobennosti algoritmov upravleniya letatel'nym apparatom pri aeros"emke [Feature of control algorithms of the flying device at the aerial photograph], *Problemy upravleniya* [Problems of control], 2012, No. 3, pp. 71-76.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Глебов.

**Гайдук Анатолий Романович** – Южный федеральный университет; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634361789; кафедра САУ; д.т.н.; профессор.

**Капустян Сергей Григорьевич** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: kar56@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ГСП-284, ул. Чехова, 2; тел.: 88634361594; Отдел ИТиПУ; ведущий научный сотрудник.

**Дьяченко Александр Александрович** – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: aleksandernet@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, ГСП-284, ул. Чехова, 2, тел.: 88634361594; младший научный сотрудник.

**Плаксиенко Елена Анатольевна** – Таганрогский институт управления и экономики; e-mail: pumkad@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 45; тел.: 88634362583; кафедра математики и информатики; к.т.н.; доцент.

**Gaiduk Anatoly Romanovich** – Southern Federal University; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; 347928, Taganrog, Nekrasovskiy, 44; phone: +78634361789; the department of automatic control systems; dr.of eng. sc.; professor.

**Kapustyan Sergeyi Grigorievich** – Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences; e-mail: kap56@mail.ru; 347928, г. Таганрог, GSP-284, Chekhov street, 2; phone: +78634361594; the department IT&CP; leading researcher.

**Dyachenko Aleksandr Aleksandrovich** – SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor; e-mail: aleksandernet@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, GSP-284, Chekhov street, 2; phone: +78634361594; junior researcher.

**Plaksienko Elena Anatolievna** – Educational Establishment of Higher Education «Taganrog Institute of Management and Economy»; e-mail: pumkad@mail.ru; 347900, Taganrog, Petrovskaya street, 45; phone: +78634362583; the department of mathematic and Informatics; cand. of eng. sc.; associate professor.