

## УПРАВЛЕНИЕ МАНЕВРОМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПОСАДКЕ НА ПОДВИЖНУЮ ПЛАТФОРМУ МЕТОДОМ „ГИБКИХ“ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ

А. А. СЕРГЕЕВ<sup>1,2</sup>, Н. Б. ФИЛИМОНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 117997, Москва, Россия

E-mail: nbfilimonov@mail.ru

Выполнены постановка и решение задачи синтеза алгоритма управления терминальным посадочным маневром беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа на подвижную платформу методом обратных задач динамики с использованием принципов „гибких“ кинематических траекторий и наведения в точку посадки. Синтезированный алгоритм управления посадочным маневром БПЛА Aerosonde апробирован в среде MatLab в условиях различных ветровых возмущений.

**Ключевые слова:** посадочный маневр БПЛА, подвижная посадочная платформа, метод обратных задач динамики, принцип „гибких“ кинематических траекторий, принцип наведения в точку посадки

**Введение.** В настоящее время во многих сферах жизнедеятельности человека широко применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа как гражданского, так и военного назначения. Они используются для поиска, спасения, мониторинга, наблюдения, инспекции, патрулирования, разведки и т.д. [1]. Поскольку завершающим и одним из самых ответственных этапов полета БПЛА является посадка, то все большую актуальность приобретает задача автоматизации управления его посадкой на определенную посадочную площадку в сложных метеорологических условиях.

К настоящему времени разработаны различные методы решения задачи управления посадкой БПЛА на стационарную неподвижную площадку. В частности, в работе авторов [2] использован метод обратных задач динамики с концепцией „гибких“ кинематических траекторий [3, 4]. Однако в ряде случаев для дозаправки и подзарядки БПЛА целесообразно использовать динамическую подвижную посадочную платформу (ППП) вместо стационарной неподвижной площадки. Такой платформой может служить палуба авианосца [5] или посадочная площадка наземного транспортного средства [6]. В настоящей работе предложенный авторами метод решения задачи управления посадкой БПЛА самолетного типа на неподвижную площадку распространяется на случай автономной посадки на ППП, оборудованную на каком-либо автотранспортном средстве (АТС).

**Постановка задачи управления посадкой БПЛА.** Прежде всего, обратимся к математическим моделям БПЛА и ППП.

Будем рассматривать БПЛА как динамический объект управления, для описания пространственного движения которого используются нормальная неподвижная система координат  $O_g X_g Y_g Z_g$ , связанная с Землей, и подвижная система координат,  $OXYZ$ , связанная с летательным аппаратом (рис. 1). Модель динамики аппарата описывается следующей системой дифференциальных уравнений [7]:

$$\dot{x}_g = u \cos \theta \cos \psi + v(\sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi) + w(\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) + W_x, \quad (1)$$

$$\dot{y}_g = u \cos \theta \sin \psi + v(\sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi) + w(\cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi) + W_y, \quad (2)$$

$$\dot{z}_g = -u \sin \theta + v \sin \varphi \cos \theta + w \cos \varphi \cos \theta + W_z, \quad (3)$$

$$\dot{u} = rv - qw - g \sin \theta + \frac{q_D S C_D}{m} + \frac{P}{m}, \quad (4)$$

$$\dot{v} = pw - ru + g \cos \theta \sin \varphi + \frac{q_D S C_Y}{m}, \quad (5)$$

$$\dot{w} = qu - pv + g \cos \theta \cos \varphi + \frac{q_D S C_L}{m}, \quad (6)$$

$$\dot{p} = \frac{I_Y - I_Z}{I_X} qr + \frac{I_{XZ}}{I_X} (\dot{r} + pq) + \frac{q_D S b}{I_X} C_l, \quad (7)$$

$$\dot{q} = \frac{I_Z - I_X}{I_Y} pr + \frac{I_{XZ}}{I_Y} (r^2 - p^2) + \frac{q_D S \bar{c}}{I_Y} C_m, \quad (8)$$

$$\dot{r} = \frac{I_Z - I_X}{I_Z} pq + \frac{I_{XZ}}{I_Z} (\dot{p} - qr) + \frac{q_D S b}{I_Z} C_n, \quad (9)$$

$$\dot{\varphi} = p + q \sin \varphi \operatorname{tg} \theta + r \cos \varphi \operatorname{tg} \theta, \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \varphi - r \sin \varphi, \quad (11)$$

$$\dot{\psi} = q \sin \varphi \sec \theta + r \cos \varphi \sec \theta, \quad (12)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{w}{u} \right), \quad \beta = \operatorname{arcsin} \left( \frac{v}{V} \right). \quad (13)$$

Здесь  $x_g, y_g, z_g$  — координаты аппарата относительно Земли  $0_g X_g Y_g Z_g$ ;  $V_g = \sqrt{\dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 + \dot{z}_g^2}$  — путевая скорость аппарата;  $u, v, w$  — скорости аппарата в связанной системе координат  $0XYZ$ ;  $W_x, W_y, W_z$  — проекции скорости ветра в системе координат  $0_g X_g Y_g Z_g$ ;  $\theta, \varphi, \psi$  и  $p, q, r$  — углы тангажа, крена, рысканья и их угловые скорости соответственно;  $P$  — сила тяги двигателей;  $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  — воздушная скорость аппарата;  $I_X, I_Y, I_Z, I_{XZ}$  — моменты инерции аппарата относительно главных осей;  $S, \bar{c}, b$  — площадь крыла, средняя аэродинамическая хорда крыла и размах крыла;  $\alpha$  и  $\beta$  — соответственно угол атаки и угол скольжения;  $C_D, C_Y, C_L$  — аэродинамические коэффициенты сил,  $C_l, C_m, C_n$  — аэродинамические коэффициенты моментов;  $q_D$  — скоростной напор ( $q_D = 0,5 \rho_B V^2$ ,  $\rho_B = 1,225 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха);  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

В качестве вектора состояния БПЛА будем рассматривать:

$$\mathbf{x} = (x_g, y_g, z_g, \dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g, \theta, \varphi, \psi, p, q, r),$$

а в качестве его управляющих переменных:

$$\mathbf{u} = (\delta_B, \delta_H, \delta_\psi, P),$$

где  $\delta_B, \delta_H, \delta_\psi$  — углы отклонения рулей высоты, направления и крена (элеронов) соответственно.

Будем рассматривать ППП, снабженную специальным устройством „улавливания“ БПЛА и оборудованную на каком-либо АТС, например, на крыше микроавтобуса. При этом для безопасности посадочного маневра аппарата выбирается прямолинейный горизонтальный участок местности протяженностью  $x_{max}$ , неровности которого могут быть компенсированы подвесками платформы и АТС. Полагаем, что АТС не маневрирует, двигаясь прямолинейно и равномерно, а посадочная траектория БПЛА имеет малое боковое отклонение от вертикальной плоскости, в которой расположена траектория движения АТС ( $y_g \ll z_g \ll x_{max}$ ).

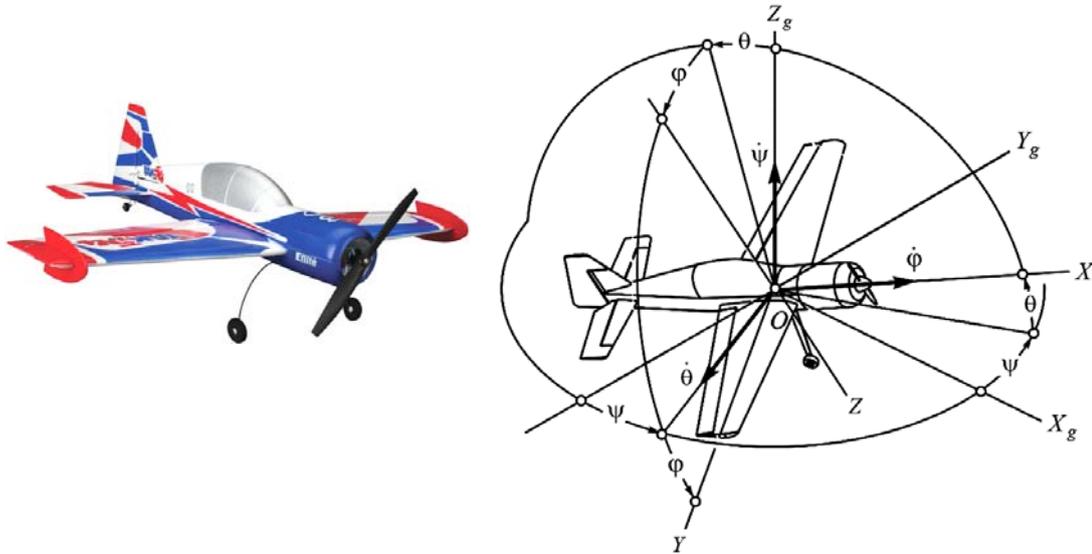


Рис. 1

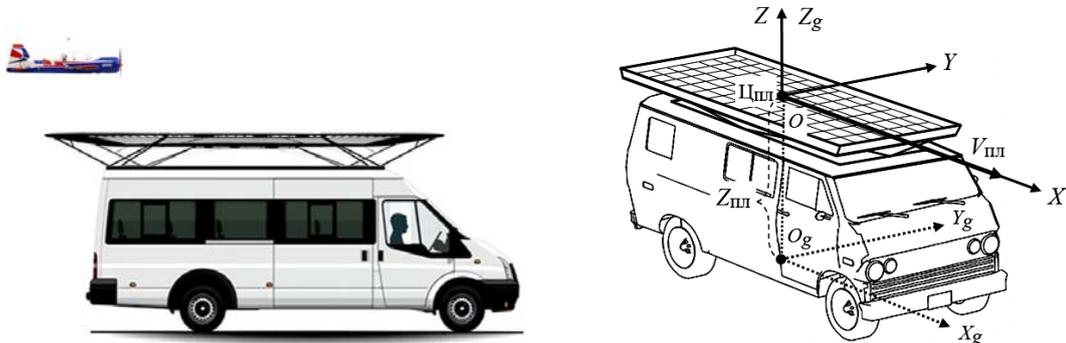


Рис. 2

Для описания движения ППП используются связанная с Землей нормальная неподвижная система координат  $O_g X_g Y_g Z_g$  и связанная с АТС подвижная система координат  $OXYZ$  (рис. 2). Модель динамики движения ППП описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_{пл} = V_{пл}, \tag{14}$$

$$\dot{y}_{пл} = 0, \quad \dot{z}_{пл} = 0, \tag{15}$$

где  $x_{пл}, y_{пл}, z_{пл}$  и  $V_{пл}$  — координаты и скорость движения платформы, определяющие ее вектор состояния:  $\mathbf{x}_{пл} = (x_{пл}, y_{пл}, z_{пл}, V_{пл})$ .

Задача управления посадочным маневром БПЛА заключается в синтезе программ отклонений рулей высоты, направления, крена и изменения тяги:

$$\delta_B = \delta_B^*(t), \quad \delta_\delta = \delta_\delta^*(t), \quad \delta_H = \delta_H^*(t), \quad P = P^*(t),$$

обеспечивающих перевод летательного аппарата (1)–(13) из произвольно заданного начального состояния  $\mathbf{x}_0$  в момент времени  $t=t_0$  в конечное состояние  $\mathbf{x}_f$  в терминальный момент

времени  $t=t_f$ , с допустимым терминальным промахом в момент сближения аппарата с ППП (14), (15):

$$|x_{g_f} - x_{пл_f}| \leq \varepsilon_x^*, \quad (16)$$

$$|y_{g_f} - y_{пл_f}| \leq \varepsilon_y^*, \quad |z_{g_f} - z_{пл_f}| \leq \varepsilon_z^*, \quad |V_{g_f} - V_{пл_f}| \leq \varepsilon_V^*, \quad (17)$$

где  $x_{пл_f}$ ,  $y_{пл_f}$ ,  $z_{пл_f}$ ,  $V_{пл_f}$  — конечные значения переменных состояния платформы;  $\varepsilon_x^*$ ,  $\varepsilon_y^*$ ,  $\varepsilon_z^*$ ,  $\varepsilon_V^*$  — предельно допустимые значения компонентов вектора терминального промаха БПЛА:  $\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_V)$ .

Приведем решение поставленной задачи управления посадкой БПЛА методом обратных задач динамики с использованием принципов „гибких“ кинематических траекторий и наведения в целевую точку.

**Принцип „гибких“ кинематических траекторий.** В теории и практике терминального управления подвижными объектами доминирует принцип „жестких“ траекторий, реализующий на основе концепции „невозмущенного—возмущенного движения“ Ляпунова—Летова программно-позиционную стратегию управления. Эта стратегия заключается в стабилизации заранее рассчитанной „жесткой“ номинальной программной траектории движения объекта, которая обеспечивает выполнение терминальной цели управления в „идеальных условиях“ (при отсутствии возмущений). В последние годы все большую популярность приобретает принцип „гибких“ траекторий, реализующий чисто программную стратегию управления [4] и заключающийся в отказе от привязки управляемого движения объекта к заранее запланированной номинальной траектории. Согласно данному принципу, в контур управления объекта включается механизм планирования „гибких“, обновляемых (пересчитываемых) с заданной периодичностью, программных траекторий движения, обеспечивающих достижение терминальной цели управления в „реальных условиях“ (при наличии возмущений) из состояния, соответствующего моменту времени ее обновления.

Обычно желаемые траектории движения БПЛА задаются в виде временной зависимости вектора пространственных координат аппарата  $\mathbf{r} = (x_g, y_g, z_g)$ :

$$\mathbf{r}(t), \quad t = \overline{t_0, t_f}. \quad (18)$$

В работах [2—4] предложен способ формализации траекторий движения летательного аппарата, основанный на их представлении пространственной кривой в окружающем физическом пространстве в системе координат  $0_g X_g Y_g Z_g$ , заданной либо системой функциональных уравнений:

$$\Phi_i(r) = 0, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (19)$$

либо параметризованной функцией:

$$\mathbf{r}(\xi), \quad \xi = \overline{0, \xi_f}, \quad (20)$$

где в качестве параметра  $\xi$  можно использовать одну из пространственных координат используемой координатной системы.

Таким образом, реализация принципа „гибких“ траекторий возможна на базе как механизма временной (18), так и пространственной (19), (20) синхронизации управляемых движений. Второй способ кардинально изменяет смысл задач управления: здесь процессы управления направлены на принуждение объекта двигаться по заданным в пространстве кривым.

Траектории посадочного маневра БПЛА конструируются в классе квазимногочленных функций:

$$z^*(x) = (z_0 - z_f) \exp(-\lambda_z x') (1 + a_{z_1} x' + a_{z_2} x'^2) (1 - x') + z_f, \quad (21)$$

$$y^*(x) = (y_0 - y_f) \exp(-\lambda_y x') (1 + a_{y_1} x' + a_{y_2} x'^2) (1 - x') + y_f, \quad (22)$$

$$x' = \frac{x - x_0}{x_f - x_0},$$

где переменные  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  и  $x_f$ ,  $y_f$ ,  $z_f$  — координаты начала и окончания посадочного маневра летательного аппарата соответственно. Параметры  $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$  задаются, а коэффициенты  $a_{z_1}$ ,  $a_{z_2}$ ,  $a_{y_1}$ ,  $a_{y_2}$  определяются начальным и конечным состояниями БПЛА из следующей системы уравнений:

$$\left. \frac{dz^*}{dx} \right|_{x=0} = \operatorname{tg} \vartheta_0, \quad \left. \frac{dz^*}{dx} \right|_{x=x_f} = \operatorname{tg} \vartheta_f, \quad \left. \frac{dy^*}{dx} \right|_{x=0} = \operatorname{tg} \xi_0, \quad \left. \frac{dy^*}{dx} \right|_{x=x_f} = \operatorname{tg} \xi_f.$$

Для „мягкой“ посадки на ППП путевая скорость  $V_g$  БПЛА должна плавно снижаться до скорости платформы  $V_{пл}$  ( $V_g \geq V_{пл}$ ):

$$V_g^*(x) = V_{g_0} + (V_{пл} - V_{g_0}) \frac{x - x_0}{x_f - x_0}. \quad (23)$$

Поскольку траектории и скорость посадочного маневра БПЛА (21)—(23) являются функциями пространственной переменной  $x$ , а уравнения его движения (1)—(13) — функцией временной переменной  $t$ , то для взаимосвязи этих переменных можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{\dot{y}_g}{\dot{x}_g}, \quad \frac{dz}{dx} = \frac{dz/dt}{dx/dt} = \frac{\dot{z}_g}{\dot{x}_g}, \quad V_g^2 = \dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 + \dot{z}_g^2. \quad (24)$$

**Принцип наведения в целевую точку.** Для расчета координаты  $x_f$ , т.е. целевой точки встречи БПЛА с ППП, используется принцип наведения в целевую точку, реализующий метод „погони с упреждением“ [8]. Согласно данному принципу, строится траектория посадочного маневра летательного аппарата, обеспечивающая его приведение в терминальный момент времени  $t = t_f$  в заданную окрестность  $\varepsilon^* = (\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \varepsilon_V^*)$  целевой точки встречи с платформой, определяемую допустимым терминальным промахом (16), (17). Уменьшение величины данного промаха достигается расчетом планируемой целевой точки встречи БПЛА и ППП в каждый момент времени обновления „гибкой“ посадочной траектории аппарата.

Для этого на основе рассчитанных программных посадочных траекторий  $z^*(x)$ ,  $y^*(x)$ , программы  $V_g^*(x)$  и соотношений (24) вычисляются планируемое терминальное время посадочного маневра  $t_f$  и координата ППП  $x_{плf}$ :

$$x_{плf} = x_{пл0} + V_{пл} t_f. \quad (25)$$

Затем на основе сравнения терминальных значений координат БПЛА  $x_f$  и ППП  $x_{плf}$  выбирается целевое конечное состояние аппарата  $\mathbf{x}_f$ :

— если выполняется условие (16), то выбираются рассчитанные конечные вектор состояния  $\mathbf{x}_f$ , посадочные траектории  $z^*(x)$ ,  $y^*(x)$  и программа  $V_g^*(x)$  летательного аппарата;

— если не выполняется условие (16), то конечной координате летательного аппарата  $x_f$

присваивается значение конечной координаты платформы  $x_{пл_f}$  (25) и производится пересчет целевого конечного вектора состояния аппарата  $x_f$ .

Таким образом, в основу принципа наведения в целевую точку  $x_f$  встречи БПЛА с ППП положено выполнение условия терминального промаха (16).

**Алгоритм управления посадкой БПЛА.** Для решения рассматриваемой задачи управления посадкой летательного аппарата разработан итерационный алгоритм, представленный в таблице.

№ шага	Операция
1	<b>Задание начального и терминального состояний</b>
1.1	Задать начальные состояния БПЛА $x_0$ и ППП $x_{пл_0}$
1.2	Задать конечные координаты $x_f, y_f, z_f$ и скорость $V_{g_f}$ БПЛА: $x_f = (x_{\max} - x_{пл_0})/2, y_f = y_{пл_f}, z_f = z_{пл_f}, V_{g_f} = V_{пл}$
1.3	Задать шаг временной сетки $\Delta t$
2	<b>Поиск координаты целевой точки встречи <math>x_f</math> и расчет программных посадочных траекторий <math>z^*(x), y^*(x)</math></b>
2.1	Положить номер итерации $k = 1$
2.2	Положить $i = 0$
2.3	Рассчитать $x_{i+1}$ по $x_i, \dot{x}_{g_i}: x_{i+1} = x_i + \dot{x}_{g_i} \Delta t$
2.4	Если $x_{i+1} \leq x_f$ , перейти к шагу 2.4.1, иначе — к 2.4.2
2.4.1	Рассчитать $y_{i+1}, z_{i+1}$ , полагая $x = x_{i+1}$ в (21), (22), и перейти к шагу 2.9
2.4.2	Рассчитать $t_f: t_f = \Delta t * i$ и перейти к шагу 2.5
2.5	Рассчитать $x_{пл_f}$ по $t_f$ согласно (25)
2.6	Если выполняется неравенство (16) при $x_{g_f} = x_i$ , перейти к шагу 2.7, иначе — к 2.6.1
2.6.1	Положить $x_f = x_{пл_f}, k = k + 1$ и перейти к шагу 2.2
2.7	Если выполняется неравенство (17) при $y_{g_f} = y_i, z_{g_f} = z_i, V_{g_f} = V_{g_i}$ , перейти к шагу 3, иначе — к 2.8
2.7.1	Если $k \leq k_{\max}$ , перейти к шагу 2.6.1, иначе — прекратить вычисления и прервать посадочный маневр БПЛА из-за его невыполнимости для заданных начальных и конечных условий
2.8	Рассчитать $V_{g_{i+1}}$ при $x = x_{i+1}$ согласно (23)
2.9	Рассчитать $\dot{x}_{g_{i+1}}, \dot{y}_{g_{i+1}}, \dot{z}_{g_{i+1}}$ при $V_g = V_{g_{i+1}}, dx = x_{i+1} - x_i, dy = y_{i+1} - y_i, dz = z_{i+1} - z_i, dt = \Delta t$ согласно (24)
2.10	Задать $\theta_i, \varphi_i, \psi_i: \theta_i \in [2^\circ, 4^\circ], \varphi_i = 0, \psi_i = \arctg((y_{i+1} - y_i)/(x_{i+1} - x_i))$
2.11	Положить $i = i + 1$ и перейти к шагу 2.3
3	<b>Расчет искомых управляющих программ <math>\delta_b^*, \delta_s^*, \delta_n^*, P^*</math></b> (все расчеты, связанные с использованием дифференциальных уравнений (1)–(12), производятся по соответствующим конечно-разностным аналогам Эйлера)
3.1	Положить $j = 0$
3.2	Если $x_j < x_f$ , перейти к шагу 3.3, иначе — прекратить вычисления в связи с найденными искомыми управляющими программами
3.3	Согласно разностным аналогам уравнений (1)–(3) рассчитать $u_{j+1}, v_{j+1}, w_{j+1}$ по $x_{j+2}, x_{j+1}, y_{j+2}, y_{j+1}, z_{j+2}, z_{j+1}$
3.4	Согласно разностным аналогам уравнений (10)–(12) рассчитать $p_{j+1}, q_{j+1}, r_{j+1}$ по $\theta_{j+2}, \theta_{j+1}, \varphi_{j+2}, \varphi_{j+1}, \psi_{j+2}, \psi_{j+1}$
3.5	Согласно разностным аналогам уравнений (4)–(9) рассчитать $\delta_b^*, \delta_s^*, \delta_n^*, P_j^*$ по $u_{j+1}, u_j, v_{j+1}, v_j, w_{j+1}, w_j, p_{j+1}, p_j, q_{j+1}, q_j, r_{j+1}, r_j$
3.6	Положить $j = j + 1$ и перейти к шагу 3.2

Следует отметить, что синтезированные на основе приведенного алгоритма программные управляющие воздействия  $\delta_v^*$ ,  $\delta_\omega^*$ ,  $\delta_n^*$ ,  $P^*$  реализуют разомкнутое управление посадкой БПЛА на ППП. Однако эти программные стратегии управления фактически реализуют механизм обратной связи путем замены начальных состояний БПЛА  $x_0$  и ППП  $x_{пп0}$  на текущие  $x$ ,  $x_{пп}$  с учетом, что современные быстродействующие бортовые ЦВМ позволяют формировать „гибкие“ посадочные траектории на каждом шаге квантования времени  $\Delta t$ .

**Компьютерная апробация алгоритма посадки БПЛА.** Для апробации разработанного алгоритма проводилось компьютерное моделирование посадочного маневра на ППП маломерного БПЛА Aerosonde [9, 10]. Моделирование выполнялось в среде MatLab с использованием разработанного программного обеспечения.

Анализ эффективности разработанного алгоритма проводился для посадочного маневра БПЛА с высоты  $z_0 = 15$  м на ППП, находящуюся на высоте  $z_{пп} = 2$  м над Землей и движущуюся со скоростью  $V_{пп} = 20$  м/с. Рассматривались различные начальные скорости летательного аппарата  $V_{g0}$  ( $V_1 = 25$  и  $V_2 = 28$  м/с) и начальные положения платформы  $x_{пп0}$  ( $r_1 = 30$  и  $r_2 = 50$  м) при отсутствии ( $W_1$ ) и наличии гармонического ( $W_2$ ) и постоянного ( $W_3$ ) ветрового возмущения. В момент обновления посадочной траектории БПЛА задавались случайное возмущение его состояния, а также состояния ППП.

На рис. 3—6 представлены результаты компьютерного моделирования посадки БПЛА Aerosonde на ППП: графики посадочных траекторий  $z(t)$  (рис. 3) и  $z(x)$  (рис. 4); графики изменения целевой точки  $x_f(x)$  (рис. 5); графики управляющих воздействий руля высоты  $\delta_v(x)$  (рис. 6).

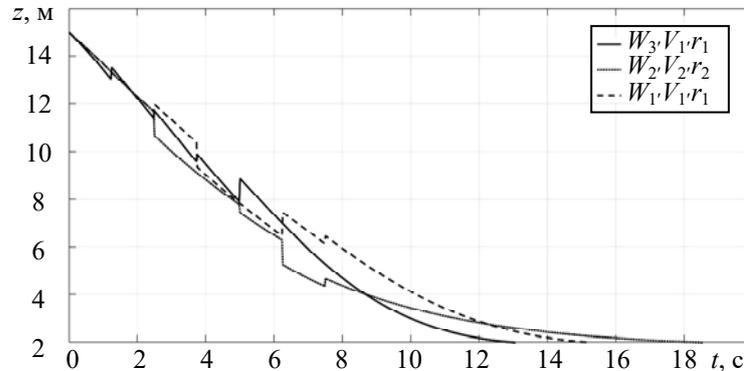


Рис. 3

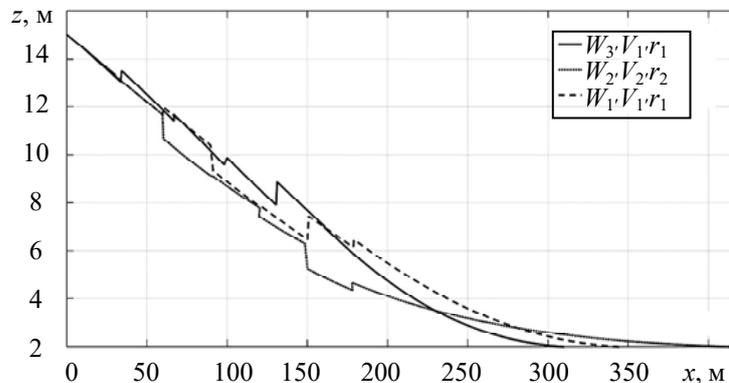


Рис. 4

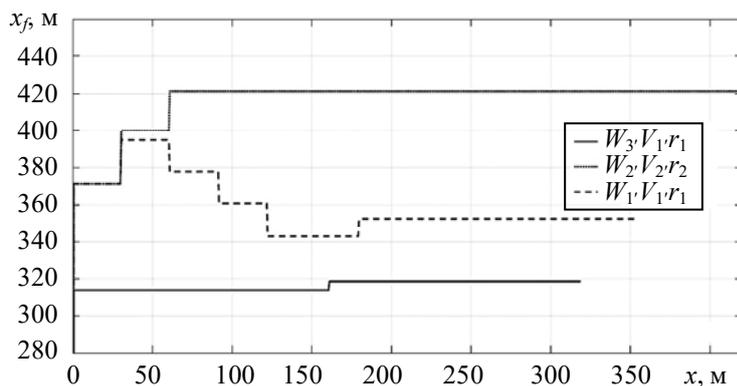


Рис. 5

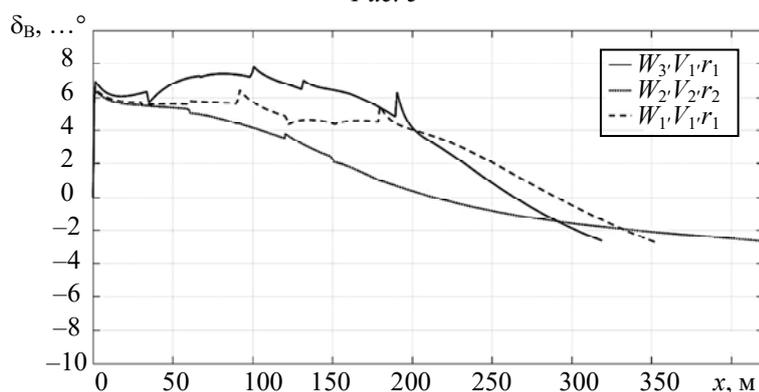


Рис. 6

**Заключение.** Поставлена и решена актуальная задача синтеза алгоритма управления посадочным терминальным маневром БПЛА на ППП. Разработан и апробирован в среде Mat-Lab алгоритм управления посадкой на подвижную платформу БПЛА Aerosonde. Результаты компьютерного моделирования показали высокую эффективность синтезированного алгоритма управления при выполнении всех необходимых требований и ограничений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспилотные летательные аппараты: Справочное пособие. Воронеж: Научная книга, 2015. 616 с.
2. Филимонов Н. Б., Сергеев А. А. Синтез алгоритма управления вертикальным посадочным маневром БПЛА методом гибких кинематических траекторий // J. of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 17—2. С. 150—156.
3. Теряев Е. Д., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Концепция „гибких кинематических траекторий“ в задачах терминального управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 7—15.
4. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Методы „гибких“ траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов // Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники. М.: Машиностроение, 2015. С. 51—110.
5. Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6. С. 14—24.
6. Russo A., Sujit P. B., Aguiar A. P., Sousa J. B., Pereira F. L. Optimal Rendezvous Trajectory for Unmanned Aerial-Ground Vehicles // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2018. Vol. 54, N 2. P. 834—847.
7. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Динамика самолета. Пространственное движение. М.: Машиностроение, 1983. 320 с.

8. Паньков С. Я., Забураев Ю. Е., Матвеев А. М. Теория и методика управления авиацией. В 2 ч. Ч. 1. Ульяновск: УВАУ ГА, 2006. 190 с.
9. Bateman F., Noura H., Ouladsine M. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for The Aerosonde UAV // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011. Vol. 47, N 3. P. 2119—2137.
10. Burston M. T., Sabatini R., Clothier R., Gardi A. Reverse Engineering of a Fixed Wing Unmanned Aircraft 6-DoF Model for Navigation and Applications // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 629. P. 164—169.

**Сведения об авторах**

- Алексей Александрович Сергеев** — аспирант; МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра физико-математических методов управления; ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, лаборатория 45; математик; E-mail: alxsrg95@gmail.com
- Николай Борисович Филимонов** — д-р техн. наук, профессор; МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра физико-математических методов управления; ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, лаборатория 45; главный научный сотрудник; E-mail: nbfilimonov@mail.ru

Поступила в редакцию  
23.07.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Сергеев А. А., Филимонов Н. Б. Управление маневром беспилотного летательного аппарата при посадке на подвижную платформу методом „гибких“ кинематических траекторий // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 803—812.

**CONTROL BY THE MANEUVER OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE  
WHEN LANDING ON A MOBILE PLATFORM USING THE METHOD  
OF "FLEXIBLE" KINEMATIC TRAJECTORIES****A. A. Sergeev<sup>1,2</sup>, N. B. Filimonov<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, 117997, Moscow, Russia<sup>2</sup>V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, 119991, Moscow, Russia  
E-mail: nbfilimonov@mail.ru

The task of synthesis of an algorithm for control of terminal maneuver of aircraft-type UAV landing on a mobile platform is formulated and accomplished by the method of reverse dynamics problems using the principles of flexible kinematic trajectories and pointing to the landing point. Results of the synthesized control algorithm for the landing maneuver of the UAV Aerosonde testing in the MATLAB environment for various wind disturbances are presented.

**Keywords:** UAV landing maneuver, mobile landing platform, method of inverse dynamics problems, principle of flexible kinematic trajectories, principle of pointing to the landing point

**REFERENCES**

1. *Bespilotnyye letatel'nyye apparaty, Spravochnoye posobiye* (Unmanned Aerial Vehicles, Reference Manual), Voronezh, 2015, 616 p. (in Russ.)
2. Filimonov N.B., Sergeev A.A. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2019, no. 2(17), pp. 150–156. (in Russ.)
3. Teryaev E.D., Filimonov A.B., Filimonov N.B., Petrin K.V. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 7–15. (in Russ.)
4. Filimonov A.B., Filimonov N.B. *Problemy upravleniya slozhnymi dinamicheskimi ob'yektami aviatsionnoy i kosmicheskoy tekhniki* (Problems of Control of Complex Dynamic Objects of Aviation and Space Technology), Moscow, 2015, pp. 51–110.
5. Podoplekin Yu.F., Sharov S.N. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy*, 2013, no. 6, pp. 14–24. (in Russ.)
6. Rucco A., Sujit P.B., Aguiar A.P., Sousa J.B., Pereira F.L. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, no. 2(54), pp. 834–847.
7. Byushgens G.S., Studnev R.V. *Dinamika samoleta. Prostranstvennoye dvizheniye* (Aircraft Dynamics. Spatial Movement), Moscow, 1983, 320 p. (in Russ.)
8. Pan'kov S.Ya., Zaburayev Yu.E., Matveyev A.M. *Teoriya i metodika upravleniya aviatsiyey. Chast' 1* (Theory and Methods of Aviation Management. Part 1), Ulyanovsk, 2006, 190 p. (in Russ.)
9. Bateman F., Noura H., Ouladsine M. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, no. 3(47), pp. 2119–2137.

10. Burston M.T., Sabatini R., Clothier R., Gardi A. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 629, pp. 164–169.

**Data on authors**

**Alexey A. Sergeev**

- PhD student; Lomonosov Moscow State University, Department of Physical and Mathematical Methods of Control; V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS; Laboratory 45; Mathematician; E-mail: alxsr95@gmail.com

**Nikolay B. Filimonov**

- Dr. Sci., Professor; Lomonosov Moscow State University, Department of Physical and Mathematical Methods of Control; V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS; Laboratory 45; Chief Researcher; E-mail: nbfilimonov@mail.ru

**For citation:** Sergeev A. A., Filimonov N. B. Control by the maneuver of an unmanned aerial vehicle when landing on a mobile platform using the method of "flexible" kinematic trajectories. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 9. P. 803—812 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-803-812