

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 681.5.013

DOI 10/17587/mau.22.156-167

А. А. Сергеев^{1, 2}, математик, аспирант, alxsrg95@gmail.com,

А. Б. Филимонов^{3, 4}, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,

Н. Б. Филимонов^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,

¹ Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва,

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва,

³ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва,

⁴ Московский авиационный институт (НИУ), Москва

Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по «гибким» кинематическим траекториям

В современном мире все большую популярность в качестве легких и недорогих инструментов как военного, так и гражданского применения находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа. Заключительным и одним из важнейших этапов полета данных БПЛА является посадка. В связи с этим задача автоматизации управления посадкой БПЛА в сложных метеорологических условиях становится все более актуальной. В ряде случаев для дозаправки и подзарядки БПЛА целесообразно использовать динамическую подвижную посадочную площадку (ППП) вместо традиционной статической (неподвижной) посадочной площадки (НПП). В данной работе рассматривается постановка и решение задачи управления терминальным посадочным маневром БПЛА как на НПП, так и на ППП, обеспечивающим его переход из текущего начального состояния в целевое терминальное состояние по «гибким» кинематическим траекториям. В качестве ППП рассматривается специальное устройство для «ловли» БПЛА, оборудованное на автомобиле.

Для решения задачи автоматической посадки БПЛА на НПП разработана математическая модель динамики его продольного движения с пространственной синхронизацией перемещений. Разработан и исследован алгоритм управления конечным вертикальным посадочным маневром БПЛА на НПП методом обратных задач динамики с использованием принципа «гибких» кинематических траекторий.

Для решения задачи автоматической посадки БПЛА на ППП разработана математическая модель динамики его пространственного движения с пространственной синхронизацией перемещений. Разработан и исследован алгоритм управления терминальным посадочным маневром БПЛА на ППП методом обратных задач динамики с использованием принципов «гибких» кинематических траекторий и наведения на точку прицеливания.

Разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее анализировать выполнение посадочного маневра БПЛА. В среде MATLAB проведена компьютерная апробация разработанных алгоритмов на примере управления посадочными маневрами БПЛА «Aerosonde» в условиях различных ветровых возмущений.

Ключевые слова: посадочный маневр БПЛА, неподвижная посадочная площадка, подвижная посадочная платформа, синтез алгоритма управления, метод обратных задач динамики, принцип «гибких» кинематических траекторий

Введение

Во многих сферах жизнедеятельности человека широкое применение находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа как гражданского, так и военного назначения [1], имеющие ряд преимуществ по сравнению с БПЛА вертолетного типа: больший радиус действия, большее время полета, лучшие аэродинамические показатели, больший коэффициент полезной нагрузки. Они весьма популярны и эффективны в качестве легких и недорогих инструментов в удаленных

операциях поиска, спасения, мониторинга, аэрофотосъемки, инспекции, научных исследований, патрулирования, разведки и т.д. Поскольку неотъемлемым завершающим и одним из самых ответственных, сложных и напряженных этапов полета любых многоразовых летательных аппаратов является посадка, то все большую актуальность приобретает задача управления безаварийной посадкой БПЛА на определенную посадочную площадку в автоматическом режиме в сложных метеорологических условиях [2]. Успешное решение данной задачи во многом определяет такие важные



Рис. 1. Статическая посадочная площадка

Fig. 1. Static landing site

характеристики БПЛА, как гибкость, мобильность, маневренность, автономность, а также низкая вероятность повреждения и высокая кратность повторного применения.

К настоящему времени разработаны различные методы решения задачи управления посадкой БПЛА на предварительно выбранную и оборудованную статическую (неподвижную) посадочную площадку (НПП) в виде земельного участка или специально подготовленной искусственной взлетно-посадочной полосы (рис. 1). Здесь можно выделить методы управления на основе GPS; методы, использующие контроллеры с типовыми ПИД законами управления; методы управления на основе обратных задач динамики; методы линеаризации обратной связью; методы управления скользящим режимом; методы нечеткого и нейросетевого управления; методы, использующие техническое зрение (см., например, работы [3–11]).

В ряде случаев для периодической дозаправки и подзарядки БПЛА вместо НПП целесообразно

использовать динамическую (подвижную) посадочную площадку (ППП) в виде платформы со специальным улавливающим устройством (рис. 2). Такой площадкой может служить для БПЛА корабельного базирования выдвигающаяся за борт движущегося судна-носителя кран-балка [12], а для наземных БПЛА — посадочная платформа с натянутой улавливающей сеткой и устройством захвата, оборудованная на каком-либо автотранспортном средстве [13].

Задача автоматического управления посадкой БПЛА на ППП становится все более актуальной, поскольку ее решение позволяет сократить время заправки топливом и увеличить зону возможной заправки, что в результате позволяет увеличить дальность и продолжительность полета, расширить круг решаемых задач. Однако приемлемые методы решения данной задачи управления посадкой до сих пор отсутствуют. В настоящей работе предлагаются алгоритмы автоматической "мягкой" посадки БПЛА по "гибким" кинематическим траекториям на НПП и ППП, синтезированные методом обратных задач динамики.

Принцип "гибких" кинематических траекторий в задачах управления терминальными маневрами БПЛА

В теории и практике терминального управления подвижными объектами доминирует *принцип "жестких" траекторий*, реализующий на основе концепции "невозмущенного—воздмущенного движения" Ляпунова—Летова программно-позиционную стратегию управления. Данная стратегия заключается в стабилизации заранее запланированной "жесткой" номиналь-



Рис. 2. Динамическая посадочная площадка

Fig. 2. Dynamical mobile landing site

ной программной траектории движения объекта, которая обеспечивает выполнение терминальной цели управления в "идеальных условиях" (при отсутствии возмущающих воздействий) движения. В последние годы все большую популярность приобретает *принцип "гибких" траекторий*, реализующий чисто программную стратегию управления [14] и заключающийся в отказе от привязки управляемого движения объекта к заранее запланированной номинальной траектории. Здесь в контур управления объекта включается механизм формирования так называемых "гибких", обновляемых (многократно пересчитываемых) с заданной периодичностью, более выгодных программных траекторий движения. Данные траектории обеспечивают выполнение терминальной цели управления объектом в "реальных условиях" (при наличии возмущающих воздействий) движения из состояний, соответствующих моментам времени их обновления. При этом рассчитываемый и исполняемый на каждом интервале обновления алгоритм программного управления является решением краевой задачи терминального управления "в большом" на основе исходной нелинейной модели динамики подвижного объекта. Согласно терминологии Н. Н. Моисеева, способ управления по принципу "жестких" траекторий именуется коррекцией по заданной программе, а способ управления по принципу "гибких" траекторий — коррекцией по конечному состоянию.

Следует отметить, что общепринятые модели движения БПЛА носят весьма общий характер и не учитывают главную специфику задач управления подвижными объектами — кинематику их движения в физическом пространстве. Дело в том, что распространенный традиционный способ планирования траекторий терминального управляемого движения БПЛА основан на задании желаемого кинематического закона движения в виде зависимости пространственных координат от времени:

$$\mathbf{r}(t), t = \overline{t_0, t_F}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r} = (x_g, y_g, z_g)$ — вектор пространственных координат; t_0 и t_F — моменты времени начала и конца маневра соответственно. Данный формализм приводит к нестационарной постановке задачи управления и включению фактора времени t в разрабатываемые алгоритмы управле-

ния, вследствие чего процесс управления оказывается жестко привязанным к запланированному терминальному моменту времени t_F . Поскольку любая программа целенаправленного движения БПЛА носит кинематический характер, то в работах [14, 15] был предложен и получил развитие способ формализации траекторий движения аппарата, основанный на их представлении пространственной кривой в окружающем физическом пространстве в системе координат $O_gX_gY_gZ_g$. В этом случае желаемую траекторию БПЛА можно задавать либо системой функциональных уравнений

$$\Phi_i(\mathbf{r}) = 0, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

либо параметризованной функцией

$$\mathbf{r}(\xi), \quad \xi = \overline{0, \xi_F}, \quad (3)$$

где в качестве параметра ξ целесообразно использовать одну из пространственных координат аппарата в системе координат $O_gX_gY_gZ_g$. Следует подчеркнуть, что при задании траектории движения БПЛА в виде (1) реализуется ее так называемая *"временная синхронизация"*, а в виде (2) и (3) — ее *"пространственная синхронизация"*.

Таким образом, реализация принципа "гибких" траекторий возможна как на базе механизма временной, так и на базе механизма пространственной синхронизации управляемых движений. Второй способ кардинально меняет смысл задач управления: здесь процессы управления направлены на принуждение объекта двигаться по заданным пространственным кривым, именуемым далее *"кинематическими траекториями"*.

Управление вертикальным посадочным маневром БПЛА на неподвижную посадочную площадку

Будем рассматривать БПЛА как динамический объект управления, для описания движения которого используется нормальная неподвижная система координат $O_gX_gY_gZ_g$, связанная с Землей, и подвижная система координат $OXYZ$, связанная с летательным аппаратом (рис. 3).

Математическая модель динамики вертикального маневра БПЛА описывается следующей системой дифференциальных уравнений [16]:

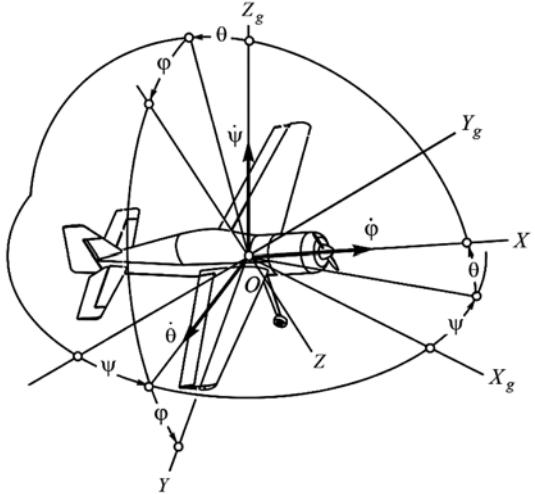


Рис. 3. Неподвижная и подвижная системы координат БПЛА

Fig. 3. Stationary and mobile systems of coordinates of UAV

$$\dot{H} = V \sin \vartheta; \quad (4)$$

$$\dot{L} = V \cos \vartheta; \quad (5)$$

$$\dot{V} = (n_x(\alpha) - \sin \vartheta)g; \quad (6)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{(n_z(\alpha) - \cos \vartheta)g}{V}; \quad (7)$$

$$\dot{\alpha} = q, \theta = \alpha + \vartheta; \quad (8)$$

$$\dot{q} = \frac{q_D \bar{c} S}{I_Y} (C_m(\alpha) + C_{m_q} \bar{c} q / V + C_{m_{\delta_B}} \delta_B). \quad (9)$$

Здесь приняты следующие обозначения: H , L — высота и дальность воздушного участка полета соответственно; V — путевая скорость; ϑ , α , θ — угол наклона траектории, угол атаки и угол тангажа соответственно; n_x , n_z — продольная и нормальная перегрузки соответственно; q — угловая скорость изменения тангажа; δ_B — угол отклонения руля высоты; C_m , C_{m_q} , $C_{m_{\delta_B}}$ — коэффициенты аэродинамического момента тангажа, продольного демпфирования и эффективности руля высоты соответственно; I_Y — момент инерции относительно поперечной оси; S , \bar{c} — площадь крыла и средняя аэродинамическая хорда крыла соответственно; q_D — скоростной напор: $q_D = \rho V^2 / 2$ (ρ — плотность воздуха); $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Отметим особенность математической модели (4)–(9) вертикального маневра БПЛА — это существенно нелинейная, многосвязная, нестационарная динамическая система шестого порядка с вектором состояния и управляющим воздействием вида

$$\mathbf{x} = (L, H, \dot{L}, \dot{H}, \theta, q), u = \delta_B,$$

функционирующая на конечном интервале времени $[t_0, t_F]$, где t_0 и t_F — моменты начала и окончания маневра соответственно.

Постановка задачи управления посадкой БПЛА. Задача управления посадочным маневром БПЛА заключается в синтезе программы отклонения руля высоты $\delta_B = \delta_B^*(t)$, обеспечивающей перевод летательного аппарата, описываемого моделью (4)–(9), из произвольно заданного начального состояния $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ в момент времени $t = t_0$:

$$\begin{aligned} L(t_0) &= L_0, H(t_0) = H_0, \dot{L}(t_0) = \dot{L}_0, \\ \dot{H}(t_0) &= \dot{H}_0, \theta(t_0) = \theta_0, q(t_0) = q_0 \end{aligned} \quad (10)$$

к терминальному моменту времени $t = t_F$ на заданную высоту H_F и дальность L_F , с заданным значением вертикальной скорости \dot{H}_F :

$$H(t_F) = H_F, L(t_F) = L_F, \dot{H}(t_F) = \dot{H}_F. \quad (11)$$

В большинстве традиционных постановок задач терминального управления фиксируется терминальный момент времени t_F . Однако для широкого круга реальных задач терминального управления подвижными объектами такое ограничение оказывается нецелесообразным или даже недопустимым с точки зрения безопасности управляемых движений. Поскольку данное ограничение нецелесообразно и для поставленной задачи управления посадочным маневром БПЛА, то ее решение будем строить с нефиксированным терминальным моментом времени t_F на основе принципа "гибких" траекторий с реализацией механизма пространствен-

ной синхронизации управляемых движений. В связи с этим полагаем, что желаемая траектория посадки БПЛА задана в виде зависимости высоты полета H от дальности $L \in [0, L_F]$:

$$H = H^*(\mathbf{x}_0, L), \quad (12)$$

где \mathbf{x}_0 — исходное состояние аппарата при $L = 0$, причем полагаем, что кривая (12) является достаточно гладкой. Управляющую программу БПЛА будем искать как функцию отклонения руля высоты δ_B от дальности полета L

$$\delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}_0, L), \quad (13)$$

обеспечивающую движение аппарата по желаемой кинематической траектории (12), удовлетворяющей заданным краевым условиям (10).

Модель пространственной синхронизации движения БПЛА в вертикальной плоскости получаем путем исключения времени t из его исходной модели (4)–(9), принимая дальность L в качестве новой независимой переменной. С этой целью поделим каждое из уравнений (4), (6)–(9) на уравнение (5):

$$\frac{dH}{dL} = \operatorname{tg} \vartheta; \quad (14)$$

$$\frac{dV}{dL} = \frac{(n_x(\alpha) - \sin \vartheta)g}{V \cos \vartheta}; \quad (15)$$

$$\frac{d\vartheta}{dL} = \frac{(n_z(\alpha) - \cos \vartheta)g}{V^2 \cos \vartheta}; \quad (16)$$

$$\frac{d\theta}{dL} = \frac{q}{V \cos \vartheta}, \quad \theta = \alpha + \vartheta; \quad (17)$$

$$\frac{dq}{dL} = \frac{q_D \bar{c} S}{I_Y V \cos \vartheta} (C_m(\alpha) + C_{m_q} \bar{c} q / V + C_{m_{\delta_B}} \delta_B). \quad (18)$$

Основная трудность решения задачи терминального управления БПЛА, описываемого моделью (14)–(18), обусловлена ее двухточечным, краевым характером, выраженным условиями (10), (11). Весьма эффективный подход к преодолению этой проблемы основан на использовании метода обратных задач динамики [17], который заключается в задании сначала желаемого программного движения объекта, удовлетворяющего заданным краевым условиям, а затем в определении управления, реализующего это движение в силу динамики объекта. Найдем управляющее воздействие на БПЛА, обеспечивающее желаемые кинематические траектории посадки БПЛА в классе квазимногочленных функций в виде зависимости высоты полета H от протяженности посадочного маневра $L \in [0, L_F]$:

матические траектории посадки БПЛА в классе квазимногочленных функций в виде зависимости высоты полета H от протяженности посадочного маневра $L \in [0, L_F]$:

$$H^*(L) = (H_0^* - H_F^*) \exp(-\lambda \tilde{L}) \times (1 + a_{H_1} \tilde{L} + a_{H_2} \tilde{L}^2) (1 - \tilde{L}) + H_F^*, \quad (19)$$

где

$$H^*(0) = H_0^*; \quad H^*(L_F) = H_F^*; \quad \lambda = 3/4; \quad \tilde{L} = \frac{L}{L_F};$$

$$a_{H_1} = \left. \frac{dH^*}{dL} \right|_{L=0} = \operatorname{tg} \vartheta_0^*; \quad a_{H_2} = \left. \frac{dH^*}{dL} \right|_{L=L_F} = \frac{\dot{H}_F^*}{V_F^*}.$$

Алгоритм управления посадкой БПЛА на НПП. Для решения рассматриваемой задачи управления вертикальным посадочным маневром БПЛА по "гибким" кинематическим траекториям (19) разработан следующий алгоритм [18], основанный на методе обратных задач динамики:

Шаг 1. Задание начальных и конечных параметров посадочного маневра БПЛА: H_0 , H_F , L_F , V_0 , V_F , \dot{H}_F , ϑ_0 .

Шаг 2. Расчет кинематической траектории посадки $H^*(\mathbf{x}, L)$ удовлетворяющей граничным условиям (10), (11) посадочного маневра БПЛА согласно (19).

Шаг 3. Расчет программы изменения угла наклона траектории $\vartheta = \vartheta^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанной программе $H^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (14).

Шаг 4. Расчет программы изменения скорости $V = V^*(\mathbf{x}, L)$ и угла атаки $\alpha = \alpha^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанным программам $H^*(\mathbf{x}, L)$ и $\vartheta^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (15), (16).

Шаг 5. Расчет программы изменения угла тангажа $\theta = \theta^*(\mathbf{x}, L)$ и угловой скорости $q = q^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанным программам V , $\alpha^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (17).

Шаг 6. Расчет искомой управляющей программы изменения руля высоты $\delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанным программам $H^*(\mathbf{x}, L)$, $\vartheta^*(\mathbf{x}, L)$, $V^*(\mathbf{x}, L)$, $\alpha^*(\mathbf{x}, L)$, $\theta = \theta^*(\mathbf{x}, L)$, $q = q^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (18).

В данном алгоритме реализация стратегии "гибких" кинематических траекторий осуществляется заменой начального состояния \mathbf{x}_0 на текущее \mathbf{x} :

$$H = H^*(\mathbf{x}, L) \Rightarrow \delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}, L),$$

в результате чего найденный алгоритм программно-позиционного управления реализует механизм обратной связи.

Синтезированный алгоритм реализован в системе MATLAB и апробирован на примере посадочного терминального маневра маломерного БПЛА "Aerosonde" [19, 20], основные параметры (весовые, инерционные, геометрические и аэродинамические) которого представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 m &= 13,5 \text{ кг}; S = 0,55 \text{ м}^2; \bar{c} = 0,19 \text{ м}; \\
 b &= 2,9 \text{ м}; I_X = 0,824 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\
 I_Y &= 1,135 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_Z = 1,179 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\
 I_{XZ} &= 0,120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\
 C_{L_0} &= 0,23; C_{Y_0} = 0; C_{D_0} = 0,0434; \\
 C_{L_a} &= 5,616 \text{ 1/рад}; C_{Y_\beta} = -0,83 \text{ 1/рад}; \\
 C_{D_q} &= 0; C_{L_q} = 7,95 \text{ с/рад}; C_{Y_r} = 0; \\
 C_{D_{\delta_B}} &= 0,013 \text{ 1/рад}; C_{L_{\delta_B}} = 0,13 \text{ 1/рад}; \\
 C_{Y_p} &= 0; C_{n_0} = 0; C_{l_0} = 0; \\
 C_{Y_{\delta_3}} &= -0,075 \text{ 1/рад}; C_{n_\beta} = 0,0726 \text{ 1/рад}; \\
 C_{l_\beta} &= -0,13 \text{ 1/рад}; C_{Y_{\delta_H}} = 0,1914 \text{ 1/рад}; \\
 C_{n_p} &= -0,069 \text{ с/рад}; C_{l_p} = -0,5 \text{ с/рад}; \\
 C_{m_0} &= 0,135; C_{n_r} = -0,0946 \text{ с/рад}; \\
 C_{l_r} &= 0,25; C_{m_a} = -2,73 \text{ 1/рад}; \\
 C_{n_{\delta_3}} &= 0,0108 \text{ 1/рад}; C_{l_{\delta_3}} = -0,075 \text{ 1/рад}; \\
 C_{m_q} &= -38,2 \text{ с/рад}; \\
 C_{n_{\delta_H}} &= -0,693 \text{ 1/рад}; C_{l_{\delta_H}} = 0,0024 \text{ 1/рад}; \\
 C_{m_{\delta_B}} &= -0,999 \text{ 1/рад}.
 \end{aligned}$$

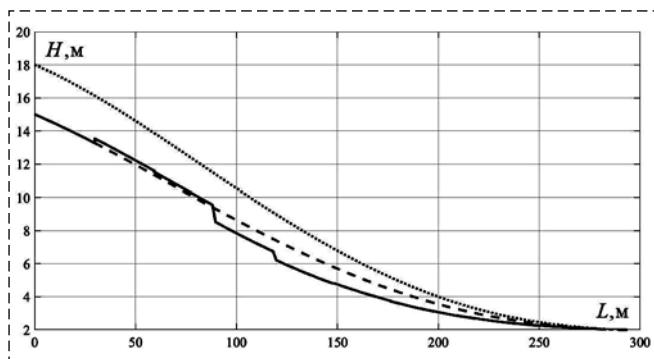


Рис. 4. Графики кинематических траекторий $H(L)$
Fig. 4. Graphs of the kinematic trajectories $H(L)$

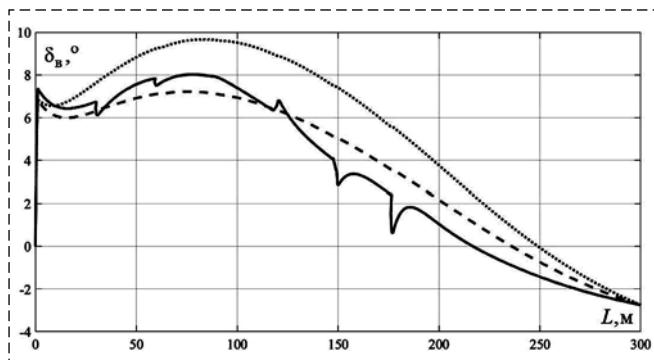


Рис. 5. Графики отклонений угла руля высоты $\delta_B(L)$
Fig. 5. Graphs of the deviations of the elevator angle $\delta_B(L)$

На основе разработанного программного обеспечения проведен анализ эффективности синтезированного алгоритма управления посадочным маневром БПЛА "Aerosonde". На рис. 4, 5 приведены графики "гибких" кинематических траекторий $H(L)$ и отклонений угла руля высоты $\delta_B(L)$ для следующих начальных и терминальных значений высоты, дальности и скорости полета:

$$\begin{aligned}
 L_0 &= 0 \text{ м}, H_{10} = 15 \text{ м}, H_{20} = 18 \text{ м}, V_0 = 25 \text{ м/с}, \\
 L_F &= 300 \text{ м}, H_F = 2 \text{ м}, V_F = 20 \text{ м/с}.
 \end{aligned}$$

На рис. 4, 5 приняты следующие обозначения: сплошная линия — посадка с высоты H_{10} без возмущений; штриховая линия — посадка с высоты H_{10} с постоянным ветровым возмущением; пунктирная линия — посадка с высоты H_{20} без возмущений.

Апробация синтезированного алгоритма показала высокое качество посадочного маневра БПЛА с выполнением необходимых требований.

Управление пространственным посадочным маневром БПЛА на движущуюся посадочную площадку

Задача управления посадкой БПЛА на ППП является более сложной, чем рассмотренная выше задача управления посадкой на НПП. Рассмотрим возможность распространения изложенного метода решения задачи управления посадкой БПЛА на НПП на случай автономной посадки на ППП, оборудованную на каком-либо автотранспортном средстве (АТС).

Будем рассматривать БПЛА как объект управления, модель динамики пространственного движения которого описывается следующей системой дифференциальных уравнений [21]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_g &= u \cos \theta \cos \psi + \\
 &+ v(\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) + \\
 &+ w(\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) + W_x,
 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{y}_g &= u \cos \theta \sin \psi + \\
 &+ v(\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) + \\
 &+ w(\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) + W_y;
 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_g &= -u \sin \theta + v \sin \phi \cos \theta + \\
 &+ w \cos \phi \cos \theta + W_z;
 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\dot{u} = rv - qw - g \sin \theta + \frac{q_D S C_D}{m} + \frac{P}{m}; \quad (23)$$

$$\dot{v} = pw - ru + g \cos \theta \sin \varphi + \frac{q_D S C_Y}{m}; \quad (24)$$

$$\dot{w} = qu - pv + g \cos \theta \cos \varphi + \frac{q_D S C_L}{m}; \quad (25)$$

$$\dot{p} = \frac{I_Y - I_Z}{I_X} qr + \frac{I_{XZ}}{I_X} (\dot{r} + pq) + \frac{q_D S b}{I_X} C_l; \quad (26)$$

$$\dot{q} = \frac{I_Z - I_X}{I_Y} pr + \frac{I_{XZ}}{I_Y} (r^2 - p^2) + \frac{q_D S \bar{c}}{I_Y} C_m; \quad (27)$$

$$\dot{r} = \frac{I_Z - I_X}{I_Z} pq + \frac{I_{XZ}}{I_Z} (\dot{p} - qr) + \frac{q_D S b}{I_Z} C_n; \quad (28)$$

$$\dot{\phi} = p + q \sin \varphi \operatorname{tg} \theta + r \cos \varphi \operatorname{tg} \theta; \quad (29)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \varphi - r \sin \varphi; \quad (30)$$

$$\dot{\psi} = q \sin \varphi \sec \theta + r \cos \varphi \sec \theta; \quad (31)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{w}{u} \right), \beta = \arcsin \left(\frac{v}{V} \right); \quad (32)$$

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha} \alpha + C_{L_q} \bar{q} / 2 / V + C_{L_{\delta_B}} \delta_B;$$

$$C_D = C_{D_0} + S / \pi / b^2 * (C_L)^2 + \\ + C_{D_q} \bar{q} / 2 / V + C_{D_{\delta_B}} \delta_B;$$

$$C_m = C_{m_0} + C_{m_\alpha} \alpha + C_{m_q} \bar{q} / 2 / V + C_{m_{\delta_B}} \delta_B;$$

$$C_Y = C_{Y_0} + C_{Y_\beta} \beta + C_{Y_p} bp / 2 / V + \\ + C_{Y_r} br / 2 / V + C_{Y_{\delta_3}} \delta_3 + C_{Y_{\delta_H}} \delta_H;$$

$$C_l = C_{l_0} + C_{l_\beta} \beta + C_{l_p} bp / 2 / V + \\ + C_{l_r} br / 2 / V + C_{l_{\delta_3}} \delta_3 + C_{l_{\delta_H}} \delta_H;$$

$$C_n = C_{n_0} + C_{n_\beta} \beta + C_{n_p} bp / 2 / V + \\ + C_{n_r} br / 2 / V + C_{n_{\delta_3}} \delta_3 + C_{n_{\delta_H}} \delta_H.$$

Здесь x_g, y_g, z_g — координаты аппарата относительно Земной системы координат $O_g X_g Y_g Z_g$; $V_g = \sqrt{\dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 + \dot{z}_g^2}$ — путевая скорость; u, v, w — скорости в связанной системе координат $OXYZ$; W_x, W_y, W_z — проекции скорости ветра в системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$; θ, φ, ψ 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; I_x, I_y, I_z, I_{xz} — моменты инерции относительно главных осей; S, \bar{c}, b — площадь крыла, средняя аэродинамическая хорда крыла и размах крыла соответственно; α и β — угол атаки и угол скольжения соответственно; C_D, C_Y, C_L — аэродинамические коэффициенты сил, а 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 вектор вида

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

а в качестве его управляющих переменных — вектор

$$\mathbf{u} = (\delta_B, \delta_H, \delta_3, P),$$

где $\delta_B, \delta_H, \delta_3$ — углы отклонения рулей высоты, направления и крена (элеронов) соответственно.

Будем рассматривать ППП в виде горизонтальной посадочной улавливающей сети, оборудованной 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,

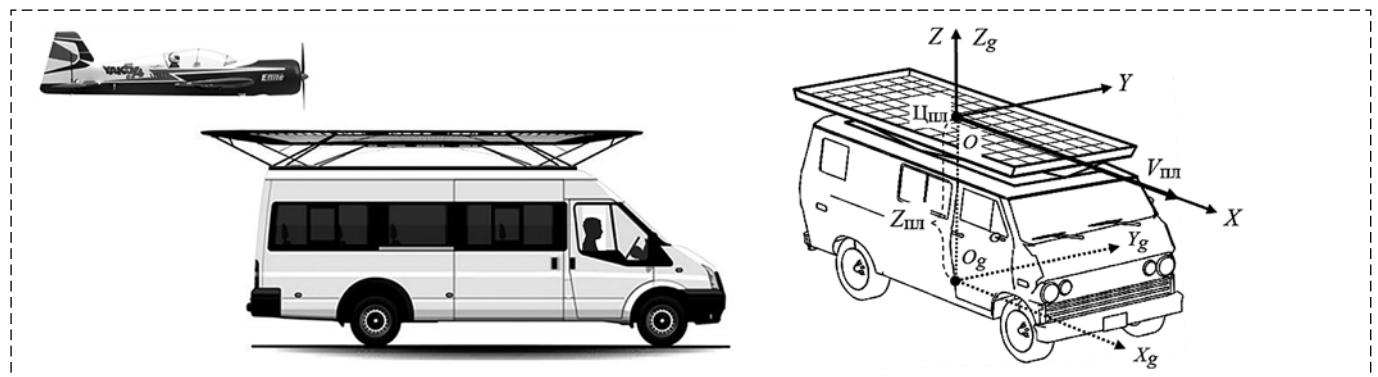


Рис. 6. Неподвижная и подвижная система координат АТС

Fig. 6. Stationary and mobile systems of coordinates of MLS

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 ($y_g \ll z_g \ll x_{\text{man}}$). Для описания движения ППП используется связанная с Землей нормальная неподвижная система координат $O_g X_g Y_g Z_g$ и связанная с АТС подвижная система координат $OXYZ$ (рис. 6). Модель динамики движения ППП описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_{\text{пл}} = V_{\text{пл}}, \quad (33)$$

$$\dot{y}_{\text{пл}} = 0, \dot{z}_{\text{пл}} = 0, \quad (34)$$

где $x_{\text{пл}}$, $y_{\text{пл}}$, $z_{\text{пл}}$ и $V_{\text{пл}}$ — соответственно координаты и скорость движения платформы, определяющие ее вектор состояния:

$$\mathbf{x}_{\text{пл}} = (x_{\text{пл}}, y_{\text{пл}}, z_{\text{пл}}, V_{\text{пл}}).$$

Постановка задачи управления посадкой БПЛА на ППП. Задача управления посадочным маневром БПЛА на ППП заключается в синтезе программ отклонений рулей высоты, направления, крена и изменения тяги:

$$\delta_{\text{в}} = \delta_{\text{в}}^*(t), \delta_{\text{в}} = \delta_{\text{в}}^*(t), \delta_{\text{в}} = \delta_{\text{в}}^*(t), P = P^*(t),$$

обеспечивающих перевод летательного аппарата, описываемого моделью (20)–(32) 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, описываемой моделью (33), (34):

$$|x_{g_F} - x_{\text{пл}_F}| \leq \varepsilon_x^*, \quad (35a)$$

$$|y_{g_F} - y_{\text{пл}_F}| \leq \varepsilon_y^*, |z_{g_F} - z_{\text{пл}_F}| \leq \varepsilon_z^*, \quad (35b)$$

$$|V_{g_F} - V_{\text{пл}_F}| \leq \varepsilon_V^*,$$

где $x_{\text{пл}_F}$, $y_{\text{пл}_F}$, $z_{\text{пл}_F}$, $V_{\text{пл}_F}$ — конечные значения переменных состояния платформы; ε_x^* , ε_y^* , ε_z^* , ε_V^* — предельно допустимые значения компонент вектора терминального промаха БПЛА: $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \varepsilon_V^*)$.

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. Следуя данному принципу, кинематические траектории посадочного маневра БПЛА будем конструировать в классе квазимногочленных функций:

$$\begin{aligned} z^*(x) &= (z_0 - z_f) \exp(-\lambda_z x') \times \\ &\times (1 + a_{z_1} x' + a_{z_2} x'^2) (1 - x') + z_f, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} y^*(x) &= (y_0 - y_f) \exp(-\lambda_y x') \times \\ &\times (1 + a_{y_1} x' + a_{y_2} x'^2) (1 - x') + y_f, \end{aligned} \quad (37)$$

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

где переменные x_0 , y_0 , z_0 и x_f , y_f , z_f — координаты начала и окончания посадочного маневра летательного аппарата соответственно. Здесь параметры λ_y , λ_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:

$$\begin{aligned} \frac{dz^*}{dx} \Big|_{x=0} &= \tan \vartheta_0, \frac{dz^*}{dx} \Big|_{x=x_f} = \tan \vartheta_f, \\ \frac{dy^*}{dx} \Big|_{x=0} &= \tan \xi_0, \frac{dy^*}{dx} \Big|_{x=x_f} = \tan \xi_f. \end{aligned}$$

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

$$V_g^*(x) = V_{g_0} + (V_{\text{пл}} - V_{g_0}) \frac{x - x_0}{x_f - x_0}. \quad (38)$$

Поскольку траектории и скорость посадочного маневра БПЛА (36)–(38) являются функциями пространственной переменной x , а уравнения его движения (20)–(32) — функцией временной переменной t , то для взаимосвязи между этими переменными можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{\dot{y}_g}{\dot{x}_g}, \frac{dz}{dx} = \frac{dz/dt}{dx/dt} = \frac{\dot{z}_g}{\dot{x}_g}, \\ V_g^2 &= \dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 + \dot{z}_g^2. \end{aligned} \quad (39)$$

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" [22]. Согласно данному принципу строится траектория посадочного маневра летательного аппарата, обеспечиваю-

щая его приведение в терминальный момент времени $t = t_F$ в заданную окрестность $\boldsymbol{\varepsilon}^* = (\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \varepsilon_V^*)$ целевой точки встречи с платформой, определяемую допустимым терминальным промахом (16). Уменьшение данного промаха достигается расчетом планируемой целевой точки встречи БПЛА и ППП в каждый момент времени обновления "гибкой" посадочной кинематической траектории посадки. Для этого на основе рассчитанных программных посадочных траекторий $z^*(x)$, $y^*(x)$, программы $V_g^*(x)$ и соотношений (39) вычисляются планируемые терминальное время посадочного маневра t_F и координата ППП $x_{\text{пл}_F}$:

$$x_{\text{пл}_F} = x_{\text{пл}_0} + V_{\text{пл}} t_F. \quad (40)$$

Затем на основе сравнения терминальных значений координат БПЛА x_F и ППП $x_{\text{пл}_F}$ проводится выбор целевого конечного состояния аппарата $\mathbf{x}_{\text{пл}}$:

- если выполняется условие (35a), то выбираются рассчитанные конечные вектор состояния \mathbf{x}_F , посадочные траектории $z^*(x)$, \mathbf{x} и программа $V_g^*(x)$ беспилотника;
- если не выполняется условие (35a), то конечной координате беспилотника x_F присваивается значение конечной координаты платформы $x_{\text{пл}_F}$ (40) и проводится пересчет целевого конечного вектора состояния \mathbf{x}_F .

Таким образом, в основу принципа наведения в целевую точку x_F встречи БПЛА с ППП положено выполнение условия терминального промаха (35a).

Алгоритм управления посадкой БПЛА на ППП. Для решения рассматриваемой задачи управления посадкой БПЛА по "гибким" кинематическим траекториям (36), (37) разработан следующий алгоритм [23], основанный методе обратных задач динамики:

Шаг 1. Задание начального и терминального состояний

1.1. Задание начальных состояний БПЛА \mathbf{x}_0 и ППП $\mathbf{x}_{\text{пл}_0}$.

1.2. Задание конечных координат x_F , y_F , z_F и скорости V_{g_F} БПЛА:

$$x_F = (x_{\text{max}} - x_{\text{пл}_0})/2,$$

$$y_F = y_{\text{пл}_F}, \quad z_F = z_{\text{пл}_F}, \quad V_{g_F} = V_{\text{пл}}.$$

1.3. Задание шага временной сетки Δt .

Шаг 2. Поиск координаты целевой точки встречи x_F и расчет программных посадочных траекторий $z^*(x)$, $y^*(x)$

- 2.1. Задание номера итерации $k = 1$.
- 2.2. Ввод значения $i = 0$.
- 2.3. Расчет x_{i+1} по x_i , \dot{x}_{g_i} : $x_{i+1} = x_i + \dot{x}_{g_i} \Delta t$.
- 2.4. Если $x_{i+1} \leq x_F$, переход к шагу 2.4.1, иначе переход к шагу 2.4.2.
 - 2.4.1. Расчет y_{i+1} , z_{i+1} , полагая $x = x_{i+1}$ в (36), (37), и переход к шагу 2.9.
 - 2.4.2. Расчет t_F : $t_F = \Delta t \cdot i$ и переход к шагу 2.5.
 - 2.5. Расчет $x_{\text{пл}_F}$ по t_F согласно (40).
 - 2.6. Если выполнено неравенство (35a) при $x_{g_F} = x_i$, переход к шагу 2.7, иначе переход к шагу 2.6.1.
 - 2.6.1. Задание $x_F = x_{\text{пл}_F}$, $k = k + 1$ и переход к шагу 2.2.
 - 2.7. Если выполнено неравенство (35b) при $y_{g_F} = y_i$, $z_{g_F} = z_i$, $V_{g_F} = V_{g_i}$, переход к шагу 3, иначе переход к шагу 2.8.
 - 2.7.1. Если $k \leq k_{\text{max}}$ переход к шагу 2.6.1, иначе прекращение вычисления и прерывание посадочного маневра БПЛА из-за его невыполнимости для заданных начальных и конечных условий.
 - 2.8. Расчет $V_{g_{i+1}}$ при $x = x_{i+1}$ согласно (38).
 - 2.9. Расчет $\dot{x}_{g_{i+1}}$, $\dot{y}_{g_{i+1}}$, $\dot{z}_{g_{i+1}}$ 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 (39).
 - 2.10. Задание θ_i , ϕ_i , ψ_i : $\theta_i \in [2^\circ, 4^\circ]$, $\phi_i = 0$, $\psi_i = \text{arctg}((y_{i+1} - y_i)/(x_{i+1} - x_i))$.
 - 2.11. Положить $i = i + 1$ и перейти к шагу 2.3.

Шаг 3. Расчет искомых управляющих программ δ_B^* , δ_{Θ}^* , δ_H^* , P^* (расчеты, связанные с использованием решений дифференциальных уравнений (20)–(32), проводятся по соответствующим конечно-разностным аналогам Эйлера).

- 3.1. Ввод значения $j = 0$.
- 3.2. Если $x_j < x_F$ переход к шагу 3.3, иначе прекращение вычисления в связи с найденными искомыми управляющими программами.
- 3.3. Согласно разностным аналогам уравнений (20)–(22) расчет 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 (29)–(31) расчет p_{j+1} , q_{j+1} , r_{j+1} по θ_{j+2} , θ_{j+1} , ϕ_{j+2} , ϕ_{j+1} , ψ_{j+2} , ψ_{j+1} .
- 3.5. Согласно разностным аналогам уравнений (23)–(28) расчет $\delta_{B_j}^*$, $\delta_{\Theta_j}^*$, $\delta_{H_j}^*$, 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. Ввод значения $j = j + 1$ и переход к шагу 3.2.

Следует отметить, что синтезированные на основе приведенного алгоритма программные управляющие воздействия $\delta_b^*, \delta_h^*, \delta_s^*, P^*$ реализуют разомкнутое управление посадкой БПЛА на ППП. Однако проведя замену начальных состояний \mathbf{x}_0 и ППП $\mathbf{x}_{\text{пл}_0}$ на текущие \mathbf{x} , $\mathbf{x}_{\text{пл}}$ и учитывая, что современные быстродействующие бортовые ЦВМ позволяют формировать "гибкие" посадочные траектории на каждом шаге квантования времени Δt , можно заключить, что данные программные стратегии управления реализуют механизм обратной связи.

Для апробации разработанного алгоритма было проведено компьютерное моделирование посадочного маневра на БПЛА "Aerosonde" на ППП. Моделирование выполняли в среде MATLAB с использованием разработанного программного обеспечения. Анализ эффективности алгоритма проводили для посадочного маневра БПЛА с высоты $z_0 = 15$ м на ППП, находящуюся на высоте $z_{\text{пл}} = 2$ м над землей и движущуюся со скоростью $V_{\text{пл}} = 20$ м/с. Рассматривали различные начальные скорости беспилотника V_{g_0} ($V_1 = 25$ м/с и $V_2 = 28$ м/с) и начальные положения платформы $\mathbf{x}_{\text{пл}_0}$ ($r_1 = 30$ м и $r_2 = 50$ м) при отсутствии (W_1) и при на-

личии гармонического (W_2) и постоянного (W_3) ветровых возмущений. В момент обновления посадочной кинематической траектории БПЛА задавалось случайное возмущение его состояния, а также состояния ППП. На рис. 7–10 представлены результаты компьютерного моделирования посадки: графики посадочных траекторий $z(t)$ (рис. 7) и $z(x)$ (рис. 8); графики изменения целевой точки $x_F(x)$ (рис. 9); графики управляющих воздействий руля высоты $\delta_b(x)$ (рис. 10). На графиках сплошная линия соответствует посадке с начальной скоростью V_1 для начального положения платформы r_1 , с ветровым возмущением W_3 ; штриховая линия соответствует посадке с параметрами V_2 , r_2 , W_2 ; пунктирная линия — посадке с параметрами V_1 , r_1 , W_1 .

Заключение

Поставлены и решены актуальные задачи синтеза алгоритма управления посадочным терминальным маневром БПЛА на неподвижную посадочную площадку и движущуюся посадочную платформу. Разработаны и апробированы в среде MATLAB соответствующие

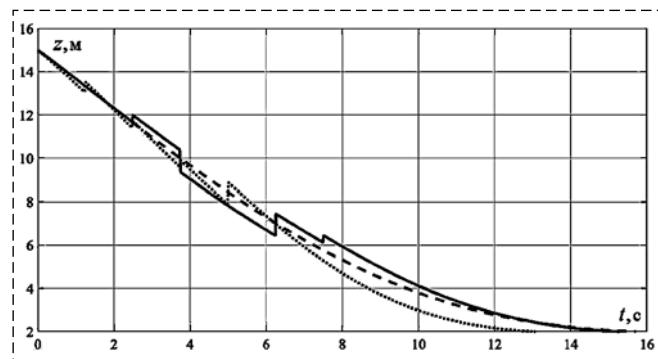


Рис. 7. Графики посадочных траекторий $z(t)$
Fig. 7. Graphs of the landing trajectories $z(t)$

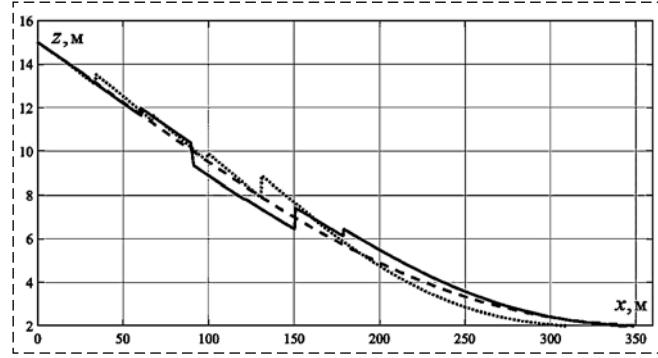


Рис. 8. Графики посадочных траекторий $z(x)$
Fig. 8. Graphs of the landing trajectories $z(x)$

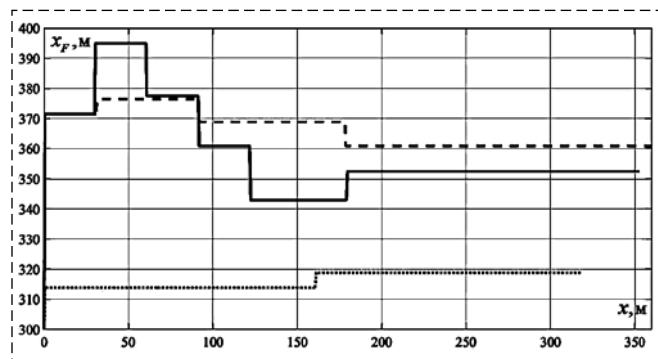


Рис. 9. Графики изменения целевой точки $x_F(x)$
Fig. 9. Graphs of the change and the goal point $x_F(x)$

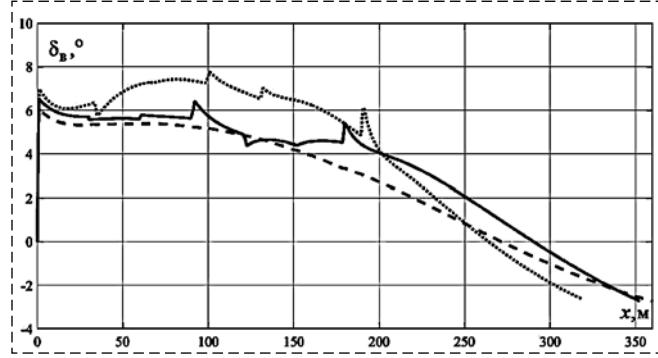


Рис. 10. Графики отклонений угла руля высоты $\delta_b(x)$
Fig. 10. Graphs of the deviations of the elevator angle $\delta_b(x)$

алгоритмы управления посадкой БПЛА "Aero-sonde". Полученные результаты компьютерного моделирования показали высокую эффективность синтезированных алгоритмов управления при выполнении всех необходимых требований и ограничений.

Список литературы

1. **Беспилотные** летательные аппараты / Справочное пособие. Воронеж: Изд-во Полиграфический центр "Научная книга", 2015. 616 с.
2. **Биард Р. У., МакЛэйн Т. У.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.
3. **Gautam A., Sujit P. B., Saripalli S.** A Survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs // In Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, USA. 2014. P. 1210–1218.
4. **Гоммер А. С.** Обзор методов автономной посадки БПЛА // Наукоемкие исследования как основа инновационного развития общества: сборник статей Международной научно-практической конференции, в 4 ч. Ч. 2. Уфа: OMEGA SCIENCE, 2019. С. 70–76.
5. **Агеев А. М., Беляев В. В., Бондарев В. Г., Проценко В. В.** Системы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов: проблемы и пути решения // Военная мысль. 2020. № 4. С. 130–136.
6. **Кравченко П. П., Куликов Л. И., Щербинин В. В.** Применение метода оптимизированных дельта-преобразований в задаче управления посадкой беспилотного летательного аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 130–144.
7. **Пенязь И. М.** Инновационные разработки, касающиеся способа безаварийной посадки современных беспилотных летательных аппаратов // Проблемы безопасности полетов. 2029. № 10. С. 34–38.
8. **Burchett B. T.** Feedback Linearization Guidance for Approach and Landing of Reusable Launch Vehicles // in American Control Conference. Proceedings of the 2005. IEEE, 2005. P. 2093–2097.
9. **Nho K., Agarwal R. K.** Automatic Landing System Design Using Fuzzy Logic // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2000. Vol. 23, N. 2. P. 298–304.
10. **Malaeck S., Sadati N., Izadi H., Pakmehr M.** Intelligent Autoland Controller Design using Neural Networks and Fuzzy Logic // in Control Conference, 5th Asian. 2004. Vol. 1. IEEE. P. 365–373.
11. **Wang R., Zhou Z., Shen Y.** Flying-wing UAV Landing Control and Simulation based on Mixed h2/h // Mechatronics and Automation, ICMA 2007. International Conference on. IEEE. 2007. P. 1523–1528.
12. **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.
13. **Hérisse B., Hamel T., Mahony R., Russotto F.-X.** Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow // IEEE Transactions on Robotics. 2012. Vol. 28, N. 1. P. 77–89.
14. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Методы "гибких" траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов / Гл. 2 в монографии "Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники". М.: Машиностроение, 2015. С. 51–110.
15. **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.
16. **Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В.** Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. М.: Машиностроение, 1979. 352 с.
17. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 406 с.
18. **Филимонов Н. Б., Сергеев А. А.** Синтез алгоритма управления вертикальным посадочным маневром БПЛА методом гибких кинематических траекторий // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. Iss. 17-2. P. 150–156.
19. **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.
20. **Bateman F., Noura H., Ouladsine M.** Faultdiagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Theaerosonde UAV // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011. Vol. 47(3). P. 2119–2137.
21. **Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В.** Динамика самолета. Пространственное движение. М.: Машиностроение, 1983. 320 с.
22. **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.
23. **Сергеев А. А., Филимонов Н. Б.** Управление посадочным маневром беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу методом "гибких" кинематических траекторий // Известия вузов. Приборостроение. 2020. № 8. С. 689–695.

Control of Autonomous Landing of UAV of Airplane-Type on the Static and Dynamic Sites with Using of "Flexible" Kinematic Trajectories

A. A. Sergeev^{1,2}, alxsrg95@gmail.com, **A. B. Filimonov**^{3,4}, filimon_ab@mail.ru,

N. B. Filimonov^{1,2}, nbfilimonov@mail.ru

¹ Trapeznikov Institute of Control Problems, RAS, Moscow, 117997, Russian Federation,

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,

³ MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,

⁴ Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding autor: Filimonov Nikolay B., Professor, Dr. Sci. Tech., Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Accepted on December 02, 2020

Abstract

The final and one of the most important stages of the aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAV) flight is landing. In this regard the problem of automating the control by UAV landing in difficult meteorological conditions is becoming increasingly urgent. In some cases for refueling and recharging UAVs it is advisable to use the dynamic mobile landing site (MLS) instead of the traditional stationary landing site (SLS). In the present paper we consider the setting of and solution of the control problem by the terminal landing maneuver of a UAV. It provides its transfer from the current initial state to the target final state along "flexible" kinematic trajectories both on the SLS and on the MLS. To solve the problem of automatic landing of UAV on SLS or MLS the mathematical model of the dynamics of its movement was developed. It's based on the concept of "flexible" kinematic trajectories with spatial synchronization of controlled movements. The control algorithm by the terminal vertical landing maneuver of UAV on SLS by the method of dynamics inverse problem using the principle of "flexible" kinematic trajectories is developed. And also the control algorithm by the terminal landing maneuver of UAV on MLS by the method of dynamics inverse problems using the principles of "flexible" kinematic trajectories and aiming into the target point was also developed. Computer approbation of the synthesized control algorithms for the landing maneuver of UAV "Aerosonde" under conditions of various wind disturbances was carried out using digital modeling in the Matlab environment.

Keywords: landing maneuver of UAV, stationary landing site, mobile landing platform, synthesis of control algorithm, method of dynamics invers problems, principle of "flexible" kinematic trajectories, principle of the guidance to the target point.

For citation:

Sergeev A. A., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of Autonomous Landing of UAV of Airplane-Type on the Static and Dynamic Sites with Using of "Flexible" Kinematic Trajectories, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 156–167.

DOI: 10.17587/mau.22.156-167

References

1. **Unmanned** aerial vehicles: Reference Guide, Voronezh, Poligraficheskij centr "Nauchnaya kniga", 2015, 616 p. (in Russian).
2. **Beard R. W., McLain T. W.** Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice, Princeton University Press, 2012, 320 p.
3. **Gautam A., Sujit P. B., Saripalli S.** A Survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs, *Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, FL, USA, 2014, pp. 1210–1218.
4. **Gommer A. S.** Review of Methods of Autonomous Landing of UAVs, *Science-intensive research as the basis of innovative development of society: collection of articles of the International scientific and practical conference*, Ufa, OMEGA SCIENCE, 2019, pp. 70–76 (in Russian).
5. **Ageev A. M., Belyaev V. V., Bondarev V. G., Protsenko V. V.** The Systems of Automatic Landing for Unmanned Aerial Vehicles, *Problems and Solutions, Military Thought*, 2020, no. 4, pp. 130–136 (in Russian).
6. **Kravchenko P. P., Kulikov L. I., Scherbinin V. V.** Application of the Method of Optimized Delta-Transformations in the Control Landing Problem for an Unmanned Aerial Vehicle, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. 786–800 (in Russian).
7. **Penyaz I. M.** The Innovative Developments Concerning a Way of Soft Landing of the Modern Unmanned Aerial Vehicles, *Problems of Safety of Flights*, 2019, no. 10, pp. 34–38 (in Russian).
8. **Burchett B. T.** Feedback Linearization Guidance for Approach and Landing of Reusable Launch Vehicles; in American Control Conference, *Proceedings of the 2005, IEEE*, 2005, pp. 2093–2097.
9. **Nho K., Agarwal R. K.** Automatic Landing System Design Using Fuzzy Logic; *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, vol. 23, no. 2, pp. 298–304, 2000.
10. **Malaek S., Sadati N., Izadi H., Pakmehr M.** Intelligent Autolanding Controller Design using Neural Networks and Fuzzy Logic, in *Control Conference, 5th Asian*, 2004, vol. 1, pp. 365–373.
11. **Wang R., Zhou Z., Shen Y.** Flying-wing UAV Landing Control and Simulation based on Mixed h2/h, *Mechatronics and Automation, ICMA 2007, International Conference on IEEE*, 2007, pp. 1523–1528.
12. **Podoplekin Yu. F., Sharov S. N.** Key Aspects of Theory and Design of Landing Systems of UAV on Small Vessels, *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 6, pp. 14–24.
13. **Hérisse B., Hamel T., Mahony R., Russotto F.-X.** Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow, *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 77–89.
14. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Methods of "Flexible" Trajectories in the Tasks of Terminal Control of Aircraft Vertical Maneuvers, *Problems of Control of Complex Dynamic Objects of Aviation and Space Technology*, Ch. 2, Moscow, Machinostroenie, 2015, pp. 51–110 (in Russian).
15. **Teryaev E. D., Filimonov A. B., Filimonov N. B., Petrin K. V.** The Conception of "Flexible Kinematic Trajectories" in the Problems of Terminal Control by Moving Objects, *Mekhatronika, Avtomatizaciya, Upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 7–15 (in Russian).
16. **Byushgens G. S.** Dynamics of the Airplane. Dynamics of Longitudinal and Transverse Motion, Moscow, Machinostroenie, 1979, 352 p. (in Russian).
17. **Krutko P. D.** Inverse Problems of Dynamics in the Theory of Automatic Control, Moscow, Mashinostroenie, 2004, 406 p. (in Russian).
18. **Filimonov N. B., Sergeev A. A.** Synthesis of Control Algorithm for the UAV Vertical Landing Maneuver by the Method of Flexible Kinematic Trajectories, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2019, no. 17–2, pp. 150–156 (in Russian).
19. **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, pp. 164–169.
20. **Bateman F., Noura H., Ouladsine M.** Faultdiagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Theaerosonde UAV, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, vol. 47(3), pp. 2119–2137.
21. **Byushgens G. S., Studnev R. V.** Dynamics of the Airplane. Spatial Motion, Moscow, Machinostroenie, 1983, 320 p. (in Russian).
22. **Panjikov S. J., Zaburaev J. E., Matveev A. M.** Theory and Methods of Aircraft Control. Ch.1, Ulyanovsk, UVAU GA, 2006, 190 p.
23. **Sergeev A. A., Filimonov N. B.** Controlling 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, no. 9, pp. 803–812 (in Russian).