

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Валерий Владимирович ШЕВАЛЬ родился в 1943 г. в городе Лениногорске Восточно-Казахстанской области. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы - в области систем автоматического управления беспилотными летательными аппаратами. Автор 93 научных работ. E-mail: sheval@list.ru.

Valery V. SHEVAL, Ph.D., was born in 1943, in Leninogorsk, The East Kazakhstan area. He is the Senior lecturer at MAI. His research interests are in automatic control systems of pilotless aircraft. He has published 93 technical papers. E-mail: sheval@list.ru.

Иван Геннадьевич КРЫЛОВ родился в 1983 г. в городе Москве. Инженер МАИ. Аспирант МАИ. Основные научные интересы - в области систем автоматического управления беспилотными летательными аппаратами. Автор 2 научных работ. E-mail: Krylov_I@mail.ru.

Ivan G. KRYLOV, was born in 1983, in Moscow. He is an Engineer at MAI. His research interests are in automatic control systems of pilotless aircraft. He has published 93 technical papers. E-mail: Krylov_I@mail.ru.

Представлена методика совместных комплексных натурных и имитационных испытаний системы управления малоразмерного беспилотного летательного аппарата (МБЛА). Показаны особенности рационального согласования результатов, получаемых на математической модели, с формированием программы проведения натурных экспериментов и с параметрами закона управления проведением автоматической посадки МБЛА. Высказано предположение об общем характере предложенной методики.

The technique of joint complex natural and imitating tests of a control system of low-sized pilotless aircraft (LSPA) is presented. Features of the rational coordination of the results received on mathematical model, with formation of the program of carrying out of natural experiments and with parameters of the law of management of carrying out of automatic landing LSPA are shown. The assumption of the general character of the offered technique is come out.

Ключевые слова: малоразмерные беспилотные летательные аппараты, автоматическая посадка, управление нестационарными объектами, комплексные испытания.

Key words: low-sized pilotless aircraft, automatic landing, management of non-stationary objects, complex tests.

Введение

Режимом, во многом определяющим эксплуатационные характеристики беспилотного летательного аппарата (БЛА), является его посадка на оборудованные площадки или на естественные грунтовые поверхности.

Наиболее часто требование обеспечения автоматической посадки предъявляется для малоразмерных БЛА (МБЛА), относительно низкая стоимость которых и широкая область возможных применений делает обеспечение каждого из мест посадки специальными радиотехническими средствами неэкономичным с эксплуатационной и экономической точек зрения. В то же время именно МБЛА становятся одним из наиболее применяемых классов БЛА.

Сложность реализации автоматического режима посадки МБЛА объясняется жёсткостью требований воспроизведения опорной траектории посадки (траектории идеального снижения) на всех высотах снижения МБЛА, а это, в свою очередь, ставит перед разработчиками автопилота МБЛА следующие задачи:

- обеспечение высокой точности автономной навигационной системы (системы измерения координат МБЛА) в режиме посадки;
- построение системы управления, удовлетворяющей противоречивым требованиям высоких быстродействия и точности;
- достижение высокого качества управления в условиях недостаточной априорной информации об аэродинамических параметрах МБЛА.

МБЛА как объект управления характеризуется некоторыми принципиальными особенностями:

— зависимость величин коэффициентов перекрёстных связей от углов атаки, скольжения, крена и тангажа, а величин аэродинамических коэффициентов — от значений параметров атмосферы и динамических параметров полёта;

— физические и аппаратурные трудности при измерении компонентов вектора состояния пары: «объект управления — рулевые приводы», усугубляемые жёсткими массогабаритными ограничениями.

Всё это существенно усложняет задачу отыскания структуры бортовой системы управления (СУ) в режиме автоматической посадки и её аппаратурно-программного воплощения.

Кроме того, одновременно необходимо решать задачу сокращения сроков и понижения стоимости экспериментальной отработки синтезируемой СУ в процессе проведения натурных испытаний для многочисленных новых образцов МБЛА.

В целях повышения качества создаваемых МБЛА при одновременном сокращении сроков и стоимости их внедрения в данной статье в качестве инструмента проведения имитационных комплексных экспериментов предлагается воспользоваться методикой, сочетающей натурные эксперименты с реальным МБЛА с имитационными экспериментами на линеаризованной математической модели одной плоскости движения МБЛА при отработке режимов автоматической посадки.

Структурная схема продольного канала МБЛА в режиме автоматической посадки и её параметры

Отметим три способа осуществления автоматической посадки:

— с наличием априорной информации о параметрах места посадки;

— с наличием лишь некоординатной информации о достаточно большом участке земной поверхности, пригодном для посадки;

— с полным отсутствием априорной информации.

В настоящей работе приведены результаты исследования СУ МБЛА, которая обеспечивает автоматическую посадку БЛА по первому способу.

При исследовании динамических характеристик движения МБЛА в режиме автоматической посадки будем использовать линейную аппроксимацию нелинейных уравнений движения МБЛА, т.е. линейные уравнения для малых отклонений относительно некоторой опорной траектории. Чтобы локально исследовать лишь продольный канал МБЛА, примем гипотезу прямолинейного горизон-

тального полёта (что, естественно, является достаточно условным приближением).

В этом случае система линейных дифференциальных уравнений для продольного движения принимает вид [1]:

$$\begin{aligned} (s + c_1)\omega_Z + (c_3s + c_2)\alpha + e_3V + c_3\delta_B &= 0; \\ -\omega_Z + (s + c_4)\alpha + e_2V + c_9\delta_B &= 0; \\ c_8\alpha + (s + e_1)V + c_7v &= 0; \\ c_6\alpha + c_{11}V - c_6v + sH &= 0; \\ -\omega_Z + sv &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где α , v и δ_B — углы атаки, тангажа и поворота рулевой машинки (РМ); ω_Z — изменения угловой скорости относительно оси OZ_1 связанной системы координат; H — изменения высоты полёта относительно опорной траектории; V — изменения воздушной скорости полёта МБЛА относительно номинального значения.

Необходимо учитывать следующее:

c_1 — определяет постоянную времени изменения ω_Z при приложении момента сил относительно центра масс МБЛА вокруг оси OZ_1 ,

$$c_1 = -\frac{m_z^{\omega_Z}}{J_Z} \frac{\rho V}{2} S(b_a)^2 = k_1V;$$

c_2 — определяет шарнирный момент МБЛА при изменении угла атаки α ,

$$c_2 = -\frac{m_z^{\alpha}}{J_Z} \frac{\rho V^2}{2} S b_a = k_2V^2;$$

c_3 — определяет эффективность руля высоты,

$$c_3 = -\frac{m_z^{\delta_B}}{J_Z} \frac{\rho V^2}{2} S b_a = k_3V^2;$$

c_4 — определяет постоянную времени изменения угла атаки,

$$c_4 = \frac{c_Y^{\alpha} + c_X}{m} \frac{\rho V}{2} S = k_4V;$$

c_5 — определяет демпфирующий момент МБЛА при изменении угла атаки α ,

$$c_5 = \frac{m_z^{\alpha}}{J_{ZZ}} \frac{\rho V}{2} S(b_a)^2 = k_5V;$$

$$c_6 = 0,01745V \cos \theta_0 = k_6V;$$

$$c_7 = 0,01745g \cos \theta_0 = r_7;$$

c_8 — определяет эффективность увеличения подъёмной силы МБЛА при увеличении угла атаки α ,

$$c_8 = \frac{c_x^\alpha - c_y}{57,3m} \frac{\rho V^2}{2} S = k_8V;$$

c_9 — определяет эффективность уменьшения угла атаки руля высоты при увеличении угла поворота этого руля, так как $\alpha_{PB} = \alpha - \delta_B$,

$$c_9 = \frac{c_{\delta_B y} \rho V}{m} S = k_9V;$$

e_1 — определяет постоянную времени изменения вертикальной скорости при приложении вертикальных сил,

$$e_1 = k_{e1}V - \frac{Pv}{m};$$

$$k_{e1} = \frac{c_x \rho S}{2m} + \frac{c_x^M M \rho S}{2m};$$

$$e_2 = 57,3c_y \left(1 + \frac{c_y^M M}{2c_y} \right) \frac{\rho S}{m} = r_2;$$

$$e_3 = k_3'V^2 - k_3''V + \frac{57,3Pv}{J_Z} y_P.$$

Приведённые выше соотношения позволяют при формировании математической модели продольного канала МБЛА частично учесть изменения аэродинамических коэффициентов при осуществлении посадки. В этом случае структурная схема математической модели (ММ) продольного канала МБЛА, замкнутого единичной отрицательной обратной связью по параметру высоты, принимает вид, показанный на рис. 1, где $W_i = \frac{1}{s + c_i}$ ($i = 1, 2$);

измерители — комплекс датчиков измерения параметров H , v и ω_z ; задатчик — блок формирования кривой посадки; регулятор — часть программного обеспечения бортового контроллера, реализующего алгоритмы управления автоматической посадкой.

Для проведения комплексных экспериментальных и имитационных исследований был выбран образец МБЛА, показанный на рис. 2. Для него на лабораторном стенде (в статике) были произведены измерения основных параметров объекта управления (планера МБЛА).

Значения аэродинамических коэффициентов, рассчитанные при значениях воздушной скорости $V = 10$ м/с и угла наклона опорной траектории $\theta_0 = 15^\circ$, приведены в таблице.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{11}	e_1	e_2	e_3
7,5	27	50	5,35	2,24	0,168	0,165	-0,037	0,006	0,26	-0,0007	5,3	-109,9

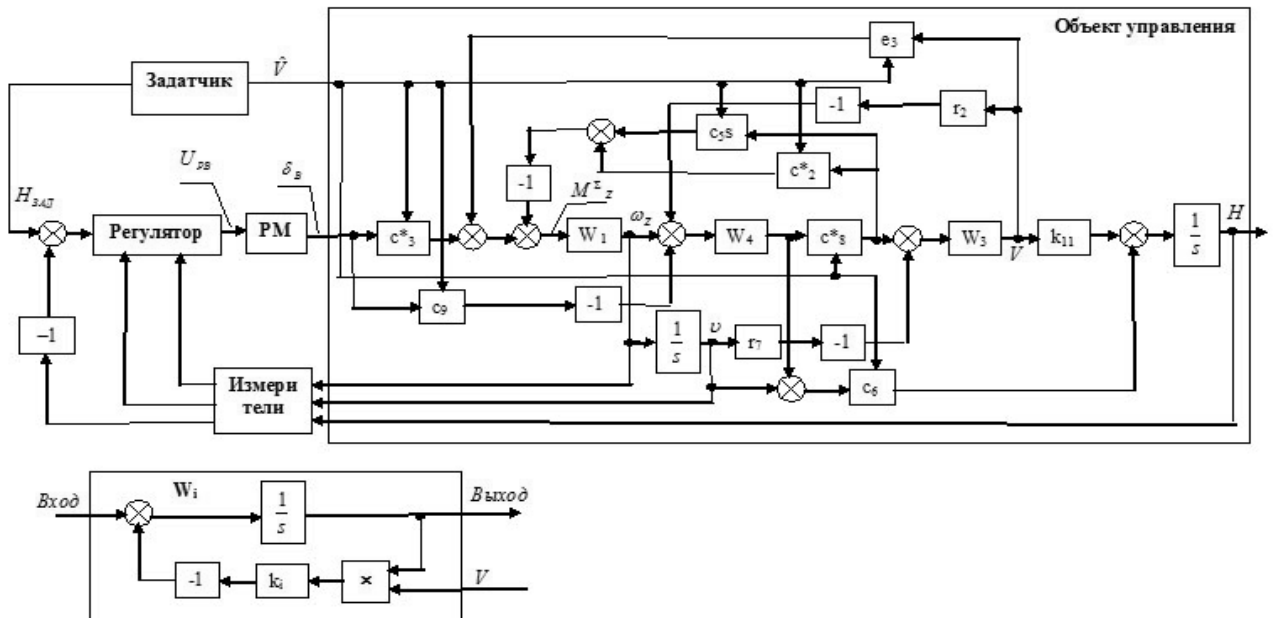


Рис. 1. Структурная схема математической модели продольного канала МБЛА



Рис. 2. Внешний вид МБЛА

При проведении экспериментальных и имитационных исследований был принят следующий закон управления автоматической посадкой МБЛА:

$$U_{PB}(n) = U_{PB0}(n) + \hat{\omega}_Z(n) \times K_{\omega_Z}(n), \quad (2)$$

где

$$K_{\omega_Z}(n) = \begin{cases} K_{\max}^{\omega} & \text{при } \Delta\omega_Z(n) > \Delta\omega_{Z1}; \\ K_1 & \text{при } |\Delta\omega_Z(n)| \leq \Delta\omega_{Z1}; \\ -K_{\max}^{\omega} & \text{при } \Delta\omega_Z(n) < -\Delta\omega_{Z1}, \Delta\omega_{Z1} > 0; \end{cases}$$

$$\omega_Z(n) = \omega_{Z\text{зад}}(n) - K_{\text{осв}} \times \hat{\omega}_Z(n);$$

$$\omega_{Z\text{зад}}(n) = v(n) \times K_v;$$

$$v(n) = v_{\text{зад}}(n) - K_{\text{осв}} \times \hat{v}(n);$$

$$v_{\text{зад}}(n) = H(n) \times K_H(n);$$

$$H(n) = H_{\text{зад}}(n) - \hat{H}(n);$$

$H_{\text{зад}}(n)$ — программные значения кривой посадки;

$\hat{H}(n)$ — показания высотомера;

$\hat{\omega}_Z(n)$ — показания бортового датчика угловой скорости;

$\hat{v}(n)$ — величина, рассчитанная по показаниям бортовых акселерометров;

$$K_H(n) = \begin{cases} K_{\max}^H & \text{при } \Delta H(n) > \Delta H_1; \\ K_1 & \text{при } |\Delta H(n)| \leq \Delta H_1 \\ -K_{\max}^H & \text{при } \Delta H(n) < -\Delta H_1, \Delta H_1 > 0. \end{cases}$$

Результаты натурных экспериментов

Задачами проведения лётных экспериментов были:

— практическое подтверждение возможности осуществления полёта МБЛА в автоматическом режиме по кривой посадки;

— определение особенностей взаимной работы математической модели продольного канала МБЛА и реальной СУ МБЛА.

Для осуществления посадки МБЛА на землю необходимо привязать с точностью до нескольких сантиметров конечную точку траектории посадки h_n к точке касания БЛА земли h_k . При отсутствии специального посадочного оборудования в месте посадки определение координат h_k (как и выбор точки h_k на местности) может производиться только с борта МБЛА.

При проведении экспериментальных работ выбор координаты точки касания МБЛА земли h_k ничем не ограничивался, а координаты точки начала формирования кривой посадки h_0 выбирались произвольно.

Ошибка воспроизведения кривой посадки $H_{\text{зад}}$ в общем случае имеет следующие составляющие:

- ошибки измерения пространственных координат центра масс МБЛА;
- ошибки измерения параметров вектора состояния МБЛА;
- динамические ошибки воспроизведения заданного воздействия следящей системой,
- ошибки, вызываемые нестационарностью параметров объекта управления.

Контролируемыми параметрами проводимых лётных экспериментов были:

- рассогласование

$$\Delta h(t) = H_{\text{зад}}(t) - h_{\text{дв}}(t),$$

где $h_{\text{дв}}$ — измеренные значения высоты МБЛА над земной поверхностью;

- амплитуда ($A_{\text{БЛА}}$) и частота ($f_{\text{БЛА}}$) собственных колебаний замкнутой СУ МБЛА.

Перед началом лётных экспериментов с помощью ММ продольного канала МБЛА определялись динамические возможности воспроизведения различных конфигураций кривых посадки, что позволяло определить допустимый диапазон изменений коэффициентов регулятора СУ МБЛА в продольной плоскости полёта МБЛА, при значениях кото-

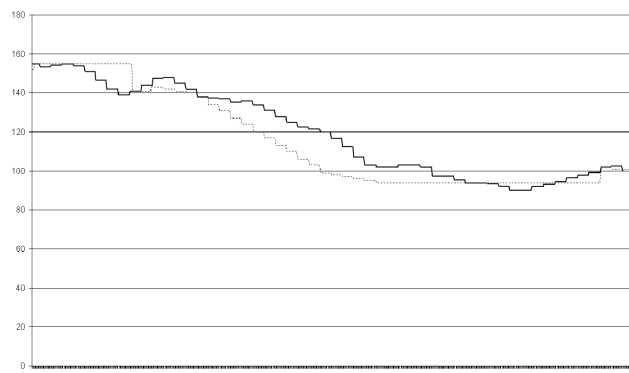


Рис. 3. Натурный эксперимент

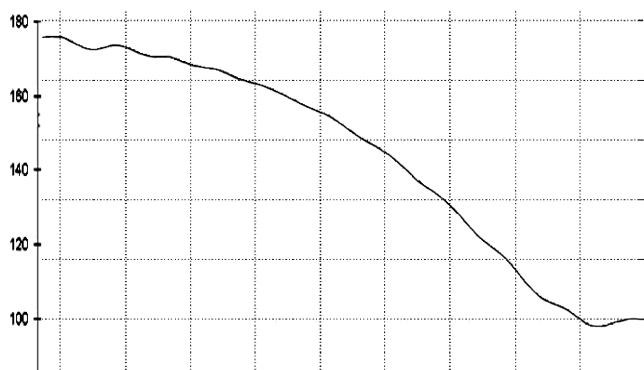


Рис. 4. Имитационный эксперимент

рых кривые посадки потенциально могут быть отработаны с Δh , не превышающими заданных ограничений (Δh_{max}) и с $f_{\text{БЛА}}$, также не превышающими заданных ограничений (f_{max}).

Наиболее показательные результаты лётных экспериментов приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 приведены результаты реализации режима автоматической посадки МБЛА. Штриховая кривая показывает задающее воздействие на замкнутый контур управления высотой МБЛА —

$$H_{\text{зад}}(n)f_{\text{БЛА}} \approx 0,14 \text{ Гц.}$$

Для сравнения на рис. 4 приведена кривая переходного процесса отработки заданного входного воздействия при имитационном эксперименте на ММ МБЛА ($V_{\text{возд}} = 10 \text{ м/с}$). Собственная частота в этом случае $f_{\text{БЛА}}^{\text{ММ}} \approx 0,14 \text{ Гц}$.

Выводы

1. Для конкретного типа МБЛА была практически осуществлена полностью автоматическая посадка.

2. Предложенная ММ продольного канала МБЛА продемонстрировала в процессе экспериментальных лётных работ хорошее совпадение имитационных результатов автоматической посадки с результатами лётных экспериментов. Данное совпадение позволяет значительно быстрее и с меньшими потерями на поисковые исследования определять закон управления продольного канала МБЛА, обеспечивающего высокую степень надёжности осуществления автоматической посадки на необорудованные участки земной поверхности.

3. Применённая для данной конкретной авиационной задачи методика организации комплексных натурных исследований сложных (нестационарных) объектов управления имеет достаточно общий характер.

Так, данная методика прошла апробацию при проектировании и экспериментальных исследованиях автоматизированной системы управления комплекса очистки производственных сточных вод, имеющих широкий диапазон изменения параметров загрязнений.

Библиографический список

Михалев И.А., Окоёмов Б.Н., Чукулаев М.С. Системы автоматического управления самолетом. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение. 1987.

Московский авиационный институт

Статья поступила в редакцию 20.04.2009