

УДК 620.5.20

Постановка задачи автоматического управления посадочным маневром беспилотного летательного аппарата при сильном боковом ветре и подходы к ее решению

Лебедев Г.Н.*, Елисеев В.Д., Ивашова Н.Д.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: kaf301@mai.ru*

***e-mail: nati2405@mail.ru*

Аннотация

Предложен новый способ посадочного маневра, во время которого самолет при сильном боковом ветре двигается навстречу ветру, в завершение выравнивая курсовой угол с помощью руля направления. Используется логическое подключение линейного и релейного регуляторов при контроле степени согласованности действий бокового и продольного каналов управления и ожидаемого качества приземления в заданной терминальной точке.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, посадка, оптимальное управление, боковой ветер, маневр.

Введение

Существующая летная практика в гражданской авиации при посадке самолетов показывает, что при сильном боковом ветре в основном используются два типа маневров во время снижения по глиссаде. В первом случае летчик стремится

двигаться, точно соблюдая заданную линию пути с несовпадающим с нулем курсовым углом, и при сходе с глissады отклонение по курсу ликвидируется. Однако в момент касания земли возникает либо ненулевой крен с приземлением на одно основное колесо шасси, либо боковая скорость оказывается значительной.

Во втором случае осуществляется предварительное отклонение в сторону действия ветра, и вблизи земли ненулевой курс выравнивается без крена. Самолет приземляется на два колеса шасси, но опасная боковая скорость оказывается еще больше, чем в первом случае.

В данной работе предложен принципиально другой подход – при сходе с глissады двигаться навстречу ветру с заранее намеченной позиции, чтобы в момент устранения крена вблизи земли и управления рулем направления боковая скорость самолета относительно земли даже при действии ветра была минимальна.

Это особенно важно для легкой беспилотной авиации, т.к. стойки шасси беспилотного летательного аппарата (БЛА) не обладают такой же прочностью, как у тяжелых самолетов. Решение данной проблемы предложено найти при следующей постановке задачи.

Постановка задачи

Дано:

1. Управление БЛА осуществляется по двум каналам продольного и бокового движения, чтобы обеспечить снижение по высоте H с заданным углом θ наклона

траектории и полет в горизонтальной плоскости по траектории, показанной на рис.

1.

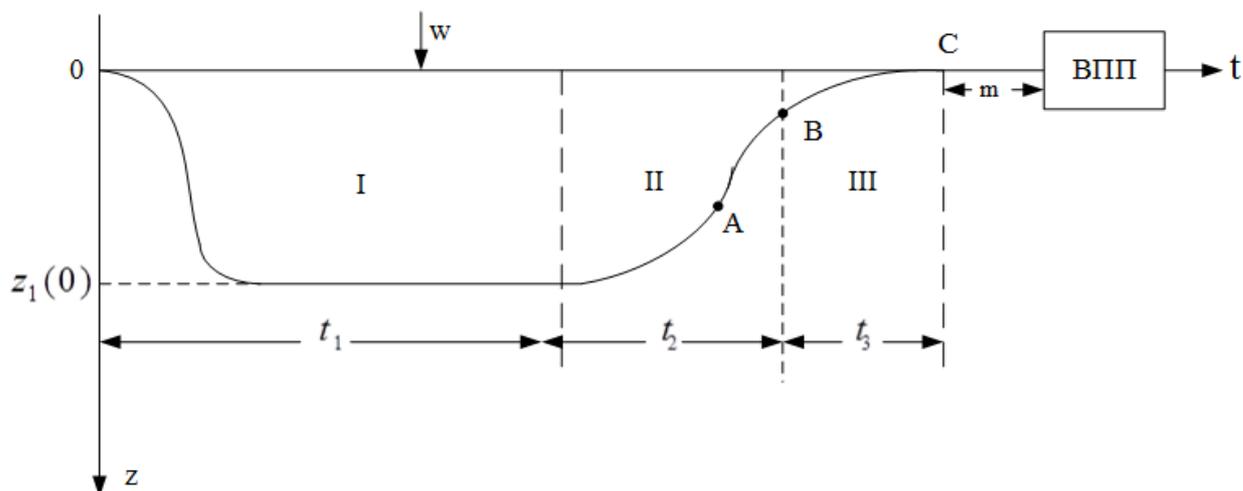


Рис. 1 – Схема бокового движения БЛА при выполнении посадочного маневра в случае сильного бокового ветра

На схеме показаны три участка – участок I расчетного отклонения на величину $z_1(0)$ от заданной линии пути, участок II возвращения при управлении по крену, участок III управления рулем направления при выходе на заданную линию пути.

2. Продольное движение в данной работе подробно не рассматривается, и считается, что снижение в заданную точку касания ВПП происходит с заданной постоянной скоростью V и углом наклона траектории θ по известному закону:

$$H(t) = H_0 - \theta V t \quad (1)$$

3. Боковое движение подчиняется следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 = V \sin(\beta - \varphi) + w \\ \dot{\omega}_y = a_{22}\omega_y + a_{23}\beta + b_{21}U \\ \dot{\beta} = a_{32}\omega_y + a_{33}\beta + a_0\beta|\beta| + b_{31}U \\ \dot{\varphi} = \omega_y \end{cases} \quad (2)$$

где z_1 – координата бокового пути; z_2 – скорость бокового движения; ω_y – угловая скорость вращения относительно вертикальной оси; β – угол дрейфа (скольжения); φ – угол рыскания; U – сигнал управления рулем направления; w – боковой постоянный ветер с неизвестной заранее величиной; $a_0, a_{22}, a_{23}, a_{32}, a_{33}, b_{21}, b_{31}$ – заданные динамические коэффициенты.

4. Критериями оптимальности бокового движения являются минимизируемые значения в терминальной точке приземления:

$z_1(t_k)$ – линейное отклонение от середины ВПП,

$z_2(t_k)$ – боковая скорость,

$z_3(t_k)$ – отклонение по курсу от заданной линии пути,

$z_4(t_k)$ – ненулевое значение крена.

Все перечисленные параметры необходимо свести к нулю, либо они должны попасть в заданную допустимую область.

Требования по отклонению $x(t_k)$ продольного движения в момент приземления и по тангажу $\vartheta(t)$ в данной работе не рассматривается.

Требуется:

– Сформировать законы управления элеронами и рулем направления при выполнении бокового посадочного маневра;

– Определить логику согласованного использования двух способов управления – линейного и релейного, чтобы с одной стороны обеспечить повышенное быстродействие при отработке внезапных порывов ветра, и с другой стороны – с высокой точностью попасть в заданную точку приземления;

– Предложить логику координированного управления боковым и продольным движением при прогнозировании качества приземления для непрерывного контроля безопасности посадки БЛА.

Общий подход к последовательности действий при выполнении посадочного маневра

Основной замысел бокового движения БЛА состоит в том, что вначале на участке I (см. рис.1) осуществляется отход на расстояние $z_1(0)$ от заданной линии пути, чтобы затем лететь параллельно ей при путевом угле, равным заданному курсу ВПП, и не равным нулю курсовом угле, для оказания противодействия боковому ветру w . Время t_1 выполнения этого действия, включая параллельный полет рядом с заданной линией пути, не лимитировано по сравнению с заранее рассчитываемой величиной $z_1(0)$, зависящей от силы бокового ветра. Поэтому участок I в данной работе не рассматривается.

Основным является участок II весьма энергичного возвращения на заданную линию пути, который должен начаться в заранее рассчитанный момент снижения по глиссаде, отстоящий от момента приземления на определенное время ($t_2 + t_3$). При этом принято допущение, что управление по крену является релейным, поэтому на

этом участке есть первая фаза «разгона» в сторону ветра в течение времени t_0 , и вторая фаза – «торможение» после того, как боковая составляющая путевой скорости достигла нужного преимущества над ветром, и БЛА приближается к заданной линии пути.

Участок III вблизи земли исключает управление по крену, и поэтому нужно перейти на использование только руля направления, стремясь двигаться по окружности, для которой характерно совпадение курсового и путевого углов, чему соответствует простая формула

$$z_1 \approx \frac{(z_2 + w)^2}{a_{\min}}.$$

Таким образом, подводя итоги рассмотрения различных действий, можно считать необходимым использование в целом по крайней мере четырех регуляторов, имеющих следующие сигналы управления:

u_1 – релейный регулятор управления элеронами при развороте БЛА по крену на участке II, действующий по закону:

$$u_1 = -a_{\max} \operatorname{sign} \left[z_1 + \frac{(z_2 + w)|z_2 + w|}{2a_{\max}} \right], \quad (3)$$

u_2 – релейный регулятор управления рулем направления на участке III, действующий по закону:

$$u_2 = -a_{\min} \operatorname{sign} \left[z_1 + \frac{(z_2 + w)|z_2 + w|}{2a_{\min}} \right], \quad (4)$$

u_3 – линейный регулятор руля направления при стабилизации курса ψ на участке II, действующий по закону:

$$u_3 = -k_1 \psi, \quad (5)$$

u_4 – линейный регулятор для исключения ненулевых углов крена γ вблизи земли на участке III, действующий по закону

$$u_4 = -k_2 \gamma. \quad (6)$$

В формулах (3) – (6) координата z_1 соответствует боковому пути, z_2 – боковая воздушная скорость.

Из приведенных рассуждений следует, что времена t_2 и t_3 выполнения действий на участках II и III должны рассчитываться либо заранее, либо в полете в реальном масштабе времени, чтобы затем при снижении по глиссаде начинать в нужный момент отдельные фазы бокового движения при достижении заданной высоты.

Время t_0 разгона от начала возвращения до точки А можно вычислить по формуле:

$$t_0 = \sqrt{\frac{z_1(0)}{a_{\max} \left(1 - \frac{w}{V}\right)}}. \quad (7)$$

В формуле (5) учтено снижение эффективности управления по крену за счет того, что курсовой угол $\frac{w}{V}$ не совпадает с направлением, перпендикулярным оси z_1 .

Обратимся теперь к участку III, на котором выполняется управление с помощью руля направления. Если учесть, что релейное управление u_1 осуществляется в упрежденную точку С, которая находится ближе точки

приземления на заранее назначенное расстояние m , чтобы создать нужный запас путевой скорости, то время t_3 можно посчитать по формуле:

$$t_3 = \frac{m}{V} \frac{1 + \sqrt{2l}}{1 - 2l}, \text{ где } l = \frac{a_{\min}}{a_{\max}}$$

или, если принять $l = \frac{1}{8}$, то упрощенно можно получить:

$$t_3 = \frac{2m}{V}. \quad (8)$$

Считая, что время t_c достижения мнимой точки С примерно равно времени τ , можно приближенно найти:

$$\tau \approx t_0 - t_3. \quad (9)$$

В качестве примера зададимся следующими параметрами:

$$a_{\max} = 2 \text{ м/с}^2; V = 40 \text{ м/с}; w = 8 \text{ м/с}; l = 0.125; m = 40 \text{ м}.$$

Тогда получим следующие оценки:

$$t_0 = 2.8 \text{ с}; t_2 = 3.6 \text{ с}; t_3 = 2 \text{ с}; \tau = 0.8 \text{ с},$$

т.е. время возвращения БЛА на заданную линию пути составляет $t_2 + t_3 = 5.6$ с, а координаты бокового пути в различных фазах маневрирования таковы, что они постепенно уменьшаются и стремятся к нулю:

$$z_1(0) = 12 \text{ м}; z_1(A) = 6 \text{ м}; z_1(B) = 3 \text{ м}.$$

Вместо формул (7 – 9) можно предложить иной, упрощенный подход. Можно убедиться, что в конце участка II при управлении по крену должен быть обеспечен запас в боковой скорости навстречу ветру, равный силе этого ветра w . Тогда при

допущении о равноускоренном движении на участках II и III можно записать условия, определяющие начало возвращения БЛА на заданную линию пути:

$$t_2 + t_3 = |w| \left(\frac{1}{a_{\min}} + \frac{1}{a_{\max}} \right); \quad z_1(0) = 0.5w^2 \left(\frac{1}{a_{\min}} + \frac{1}{a_{\max}} \right). \quad (10)$$

Теперь осталось объединить все необходимые действия с помощью только двух регуляторов – для управления элеронами u_3 и для управления рулем направления u_p , если сформировать специальную функцию переключения $\Phi(z_1, z_2)$, равную нулю либо единице:

$$\begin{aligned} u_3 &= u_1 \Phi + u_3 (1 - \Phi), \\ u_p &= u_2 \Phi + u_4 (1 - \Phi). \end{aligned} \quad (11)$$

В свою очередь функция Φ может быть назначена, исходя из условия пересечения в точке В фазовых траекторий, как это показано на рис. 2.

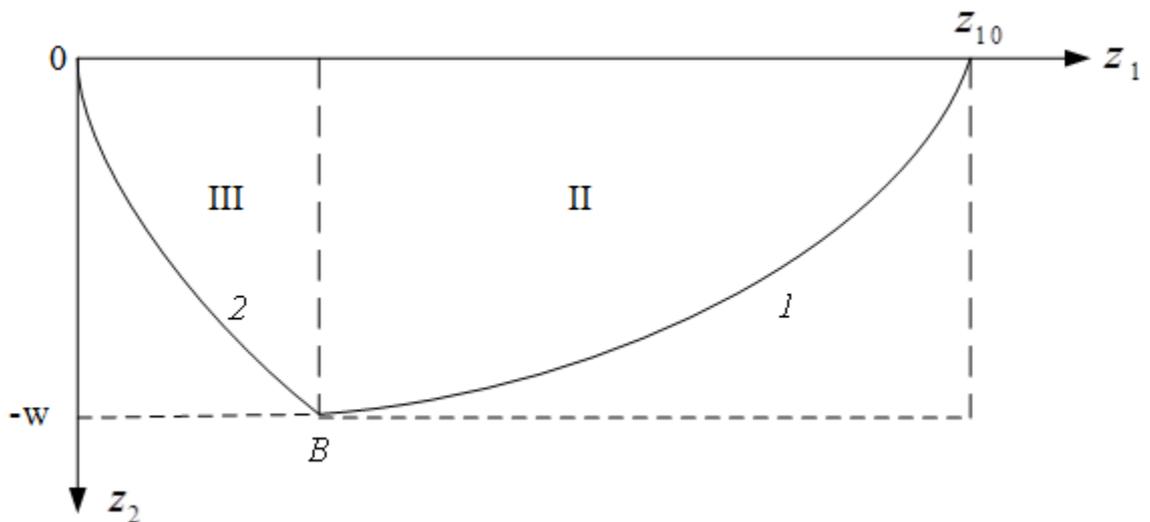


Рис. 2 – Пересечение фазовых траекторий при боковом посадочном маневре

График 1 – при управлении по крену, график 2 – при управлении рулем направления.

Для графика 1 справедлива следующая формула:

$$z_1 = m - \frac{(z_2 + w)|z_2 + w|}{2a_{\max}},$$

а для графика 2 при релейном управлении u_2 можно записать следующая формула:

$$z_1 = -\frac{(z_2 + w)|z_2 + w|}{2a_{\min}}$$

Приравнивая представленные выражения друг другу, получим условие попадания в точку В:

$$0.5 (z_2 + w)|z_2 + w| \left(\frac{1}{a_{\max}} - \frac{1}{a_{\min}} \right) = m. \quad (12)$$

Или для отрицательных путевых скоростей $(z_2 + w)$, справедливых при $z_1(0) > 0$,

$$(z_2 + w)^2 = \frac{2m}{\left(\frac{1}{a_{\min}} - \frac{1}{a_{\max}} \right)}.$$

Например, пусть $m = 40$; $l = 0.125$; $a_{\max} = 2$, тогда $|z_2 + w| = 4.7$ м/с и значит при $w = 8$ м/с само значение воздушной скорости $z_2 = -(4.7 + 8) = -12.7$ м/с.

При таком запасе по скорости движения управление только рулем направления неопасно, и в точке приземления боковая путевая скорость будет близка к нулю.

С учетом сделанного пояснения формулу (12) можно использовать для назначения функции Φ следующим образом:

$$\Phi = 0.5 \left[1 - \text{sign} \left\{ 2m - (z_2 + w)|z_2 + w| \left(\frac{1}{a_{\max}} - \frac{1}{a_{\min}} \right) \right\} \right]. \quad (13)$$

Формула (13) указывает, что если непрерывно контролировать значения воздушной скорости z_2 и силы бокового ветра w , то можно определить удачный момент перехода на управление рулем направления БЛА.

Однако чтобы само управление было более плавным, целесообразно наряду с релейными регуляторами использовать линейные регуляторы на завершающих стадиях полета вблизи земли.

Если учесть ограничение по крену из-за малой высоты вблизи земли, то допустима следующая оценка боковой перегрузки:

$$a_{\max} = \frac{g}{l} \left(\frac{\theta}{\omega} |w| - H_{\min} \right),$$

при $\omega V \leq a_{\max} \leq 0.5g$.

Выбор структуры законов линейного и релейного управления боковым движением БЛА

Линейное управление, особенно важное вблизи земли в момент приземления БЛА, может быть реализовано с помощью оптимального регулятора, синтезированного с помощью динамического программирования [1] на основе аналитического конструирования оптимальных регуляторов [2]. В частности, если допустить описание бокового движения в виде системы второго порядка, то можно получить структуру линейного регулятора как для элеронов, так и для руля направления:

$$u_1 = -k_0 w - k_1 z_1 - k_2 z_2, \quad (14)$$

где k_1, k_2 – синтезированные передаточные числа.

Процесс релейного управления наиболее характерен для участка II посадочного маневра, а также в случае, когда возникает неожиданный порыв бокового ветра, и очень важно быстро на него среагировать. Согласно принципу максимума Понтрягина [3] можно упрощенно записать структуру релейного управления в виде:

$$u_2 = -\delta \operatorname{sign} \left[z_1 + \frac{|z_2 + w|(z_2 + w)}{2\delta} \right], \quad (15)$$

где δ – максимально допустимый угол отклонения элеронов.

Формулы (14) и (15) показывают, что для успешного управления нужно иметь оценку возникающего ветра w , поэтому в систему управления должен быть встроен специальный идентификатор, как это показано в [4].

Представленные формулы (14) и (15) требуют дальнейшего уточнения.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложен иной подход в выполнении посадочного маневра при движении БЛА навстречу ветру, состоящий из трех участков. На первом участке осуществляется расчетное отклонение от заданной линии пути в сторону, противоположную действию ветра, при последующем движении по посадочному курсу.

На втором участке при управлении по крену начинается возвращение к глиссаде, но с ненулевой боковой скоростью, направленной навстречу ветру. На третьем участке снижения вблизи земли управляя рулем направления, отклонение

по крену ликвидируется с тем расчетом, чтобы в момент касания шасси земли боковая скорость становилась равной нулю.

2. Для повышения быстродействия системы управления предложено подключение к линейному регулятору релейного, с использованием специального логического анализатора, контролирующего знаки отклонений по положению и скорости бокового движения.

Работа выполнена при материальной поддержке гранта РФФИ № 12-08-00028а

Библиографический список

1. Беллман Р. Динамическое программирование. – М., ИИЛ, 1961г,- 400с.
2. Летов А.М. Динамика полета и управление. – М., Наука, 1969г,- 360с.
3. Понтрягин Л.С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983г,- 393с.
4. Лебедев Г.Н., Ефимов А.В. Применение динамического программирования в задаче маршрутизации полета БЛА. // Самара, Научный вестник СГАУ, 2011, № 3,- с. 222 - 229.