

На правах рукописи

Ивашова Наталия Дмитриевна

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫМ
МАНЕВРОМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ
ДЕЙСТВИИ БОКОВОГО ВЕТРА**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Лебедев Георгий Николаевич

Официальные оппоненты: **Сельвесюк Николай Иванович**,
доктор технических наук, доцент,
Государственный научный центр Российской Федерации «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС), главный научный сотрудник

Гребенкин Александр Витальевич,
доктор технических наук,
Открытое акционерное общество «Московский институт электромеханики и автоматики», начальник отдела

Ведущая организация: Открытое акционерное общество Московский научно-производственный комплекс «Авионика» им. О.В. Успенского (ОАО МНПК «Авионика»)

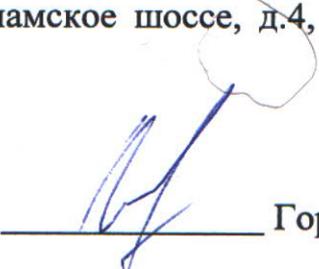
Защита диссертации состоится «27» апреля 2015 г. в 10ч. 00мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4., зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=56019

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Отзывы просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.11
к. т. н., доцент


Горбачев Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Существующая практика посадки пилотируемых самолетов гражданской авиации показывает, что при сильном боковом ветре в основном используются два типа маневров при снижении по глиссаде. В одном случае отклонение по курсу ликвидируется при управлении по крену, и тогда повышается риск приземления на одно колесо шасси либо значительного возрастания боковой скорости, что недопустимо при недостаточной прочности стоек шасси.

В другом случае осуществляется предварительное отклонение в сторону ветра, а вблизи земли ненулевой курс выравнивается без крена. При этом боковая скорость оказывается еще больше, чем в первом случае. Таким образом, известными способами ручного управления невозможно одновременно свести к нулю углы крена, пути и курса в момент приземления.

Особенно остро существует проблема безопасной посадки на шасси у легких беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в сложных погодных условиях, когда в отсутствие человека необходимо решить задачу автоматического управления либо с борта, либо с земли. Поэтому тема данной диссертационной работы, посвящённой решению задачи автоматической посадки БЛА при сильном боковом ветре, является **актуальной**.

Цель диссертационной работы – это повышение безопасности посадки БЛА при расширенном диапазоне ветровых возмущений.

Объект исследований – система автоматического управления посадкой БЛА при снижении по глиссаде и выравнивании.

Предметом исследования является математическое и программно-алгоритмическое обеспечение многорежимного управления боковым и продольным движением с определением области приемлемых отклонений БЛА от номинальной траектории в начале выравнивания и оценкой преимуществ предложенного подхода.

На защиту выносятся следующие основные научные положения:

1. Многорежимный способ выполнения посадочного маневра при начальном боковом движении в попутную ветру сторону от линии пути и последующем движении навстречу ветру при снижении по глиссаде и управлении по крену с целью устранения на конечном участке выравнивания отклонения по курсу и путевому углу при управлении рулём направления.

2. Формулы расчета моментов переключения режимов управления боковым движением ЛА и соответствующих уставок в регуляторы при учете влияния бокового ветра.

3. Алгоритмы координации работы каналов бокового и продольного движения с помощью изменения передаточных чисел квазилинейных регуляторов.

4. Единый параметрический критерий оценки качества приземления и границы области приемлемого качества полета БЛА в точке выравнивания, внутри которой гарантируется безопасность посадки.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. В предложенном способе выполнения маневра летательный аппарат не движется все время вдоль заданной линии пути, а осуществляет отход от неё с последующим возвращением. При этом к началу выравнивания боковое движение в отличие от известных способов происходит навстречу боковой составляющей ветра. Это создаёт принципиальную возможность при выравнивании добиться одновременного обнуления путевого и курсового углов в точке приземления при отсутствии крена.

2. Для каждого из четырех участков посадки (см. схему бокового движения БЛА при выполнении посадочного маневра при сильном боковом ветре, рисунок 1) аналитически определены границы и уставки в регуляторы как алгебраические функции от скорости БЛА и силы бокового ветра. Это позволяет в реальном масштабе времени автоматизировать процесс переключения режимов управления посадкой таких ЛА.

3. Найденный на основе динамического программирования алгоритм координации позволил получить структуру не линейных, а квазилинейных

регуляторов управления элеронами и рулем высоты. При этом предложено увеличивать передаточные числа в одном регуляторе при одновременном их уменьшении в другом в зависимости от отставания или опережения работы одного канала от другого.

4. Предложенный единый параметрический критерий качества приземления учитывает с помощью мультипликативных членов неудачное сочетание в точке приземления отклонений по положению, курсу и путевой скорости от линии пути. С его помощью найдена область приемлемых отклонений в точке начала выравнивания, что позволяет при выходе из неё сформировать вынужденную команду ухода на повторный круг.

Практическая ценность работы состоит в том, что с помощью предложенного подхода удается значительно расширить условия разрешенной посадки при силе бокового ветра, в $1,5 \div 2$ раза большей существующих в рамках поставленной задачи летных норм. Кроме того, внутри допустимых норм общее качество приземления существенно повышается, т.к. обнуление необходимых отклонений происходит одновременно. Также при использовании предлагаемого подхода исключается влияние человеческого фактора, т.к. предлагается использовать систему автоматического управления. При этом соответственно возрастает безопасность приземления, поскольку обеспечивается приемлемое качество приземления даже в увеличенной в 2 раза области внезапных отклонений в начале выравнивания, возникающих в результате резких порывов ветра.

Достоверность полученных результатов определяется тем, что обнаруженный технический эффект повышения безопасности посадки подтвержден результатами моделирования полета. Кроме того, один из способов координации работы каналов управления боковым движением и высотой найден с помощью научно-обоснованного метода теории оптимального управления – динамического программирования.

Ценность работы для науки и практики определяется тем, что предложенный способ посадки реализован в виде алгоритма работы системы автоматического регулирования координированным движением на основе теории

оптимальных систем и обеспечивает существенное повышение качества приземления в расширенной области ветровых возмущений.

Личный вклад автора состоит в проведении анализа известных способов посадки самолетов на шасси; разработке алгоритмов многорежимного управления и координации работы линейных и релейных регуляторов в разных каналах бокового и продольного движения; личном участии в моделировании на ЭВМ и подготовке основных публикаций.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 5 работ, из них 3 – в изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК. Научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на международном научно – техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» г. Алушта в 2013 и 2014 годах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Работа изложена на 116 страницах и содержит 31 рисунок и 6 таблиц. Список использованных источников включает 40 ссылок по теме проводимых в диссертационной работе исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, указана их научная и практическая ценность, обоснована достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов.

В первой главе проводится анализ известных систем управления посадкой летательного аппарата (ЛА) на шасси. Выявлены недостатки существующих способов ручного управления посадкой при наличии сильного бокового ветра. Обоснована целесообразность применения системы автоматического управления посадкой для обеспечения нужной терминальной точности в момент приземления ЛА. Сформулирована постановка задачи автоматического управления посадкой

беспилотного летательного аппарата (БЛА) при новом способе маневрирования в канале бокового движения во время снижения по глиссаде.

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 рисунке 1.

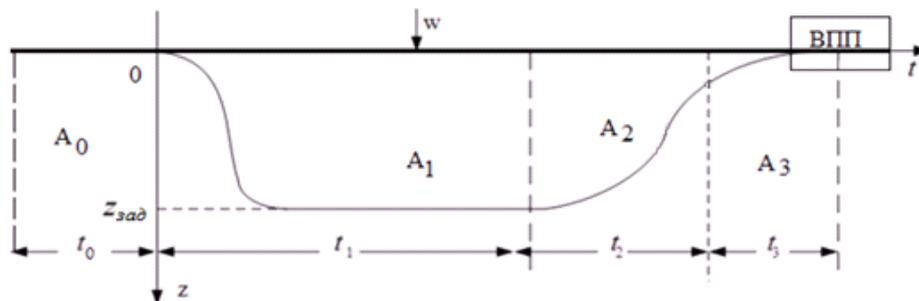


Рисунок 1 – Схема бокового движения БЛА при выполнении посадочного маневра при сильном боковом ветре

На схеме показаны четыре участка – участок A_0 обычного полета по заданной линии пути, участок A_1 расчетного отклонения на величину $z_{зад}$ от заданной линии пути, участок A_2 возвращения к линии пути при управлении по крену, участок A_3 управления рулем направления при выходе на заданную линию пути.

2. В продольном канале осуществляется следующее движение: сначала происходит снижение с некоторой начальной высоты H_0 по глиссаде с углом наклона θ_{max} , а затем по достижении заданной высоты начала выравнивания H_v , начинается движение по траектории с меньшим углом наклона θ_{min} . Начало этапа выравнивания совпадает с началом управления по закону участка A_3 . Закон изменения высоты имеет следующий общий вид:

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

где θ принимает значения θ_{max} и θ_{min} в зависимости от участка, на котором находится БЛА, V – текущая скорость полета, которую, как предполагается, автомат тяги поддерживает постоянной.

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 на каждом из участков;
- Определить логику переключения с одного закона управления на последующий и определить размеры каждого из участков маневра;
- Предложить логику координированного управления боковым и продольным движением при прогнозировании качества приземления для непрерывного контроля безопасности посадки БЛА.

При анализе известных методов теории оптимального управления делается вывод о целесообразности использования динамического программирования для координации работы каналов бокового и продольного движения БЛА.

Во второй главе рассматриваются процессы управления боковым и продольным движением БЛА на различных участках предложенного способа маневрирования при учете действия в процессе посадки сильного бокового ветра. Предусмотрено многорежимное управление посадкой на четырех участках маневрирования. Для каждого участка получены законы управления рулем высоты, рулем направления и элеронами. При этом считается достаточным использование линейных регуляторов, передаточные числа которых определены методом аналитического построения оптимальных регуляторов.

Третья глава посвящена формированию логики переключения с одного режима автоматической посадки на другой при попадании в очередную область A_i , показанную на рисунке 1. При этом необходимо определить размеры этих областей в зависимости от силы бокового ветра и назначить задающие воздействия и передаточные числа регуляторов для каждой из них при следующих допущениях: скорость полета V постоянна, снижение по глиссаде происходит вначале с углом наклона θ_{\max} , а при выравнивании – с меньшим углом наклона θ_{\min} , координаты x_0 , z_0 точки приземления и путевого угол Ψ_0 заданы, используются три регулятора – управления рулем высоты, рулем направления и элеронами.

Найдены границы областей при вычислении дальностей r_0 , r_1 , r_2 , r_3 до заданной точки приземления по формулам:

$$r_3 = \frac{H_{\min}}{\theta_{\min}}; r_2 = r_3 + Vt_2 = r_3 + CwV, \text{ где } C = 0,8 \div 0,9;$$

$$r_1 = r_2 + \Delta S = r_3 + 2\Delta S = r_3 + 2CwV; r_0 = \frac{H_0}{\theta_{\max}} + H_{\min} \left(\frac{1}{\theta_{\min}} - \frac{1}{\theta_{\max}} \right), \quad (3)$$

где H_0 – заданное значение высоты начала снижения по глиссаде, H_{\min} – минимальное значение в начале выравнивания вблизи земли, w – скорость бокового ветра.

Формулы (3) позволяют определить контрольные значения высоты полета в точках приземления, если рассчитанные дальности участков умножить на угол наклона траектории:

$$H_i = \theta_{max} (r_i - r_3) + H_3, \quad (4)$$

При назначении уставок в регуляторы в виде задающих воздействий важными являются следующие две предложенные принципиально новые оценки, полученные экспериментально путем моделирования на ЭВМ:

$$z_{зад} = \text{sign}(w) \frac{9|w| + 0.68w^2}{0.1V}; \quad \Psi_{зад} = \frac{0,5w}{V}, \quad (5)$$

где $z_{зад}$ – планируемое на участке A_1 боковое отклонение от обычной заданной линии пути в сторону, противоположную направлению ветра, $\Psi_{зад}$ – требуемый на участке A_2 путевой угол после завершения маневра по крену, чтобы ЛА при выравнивании двигался навстречу ветру с некоторой скоростью.

Остальные уставки, передаваемые в регуляторы, для наглядности сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Определение участков посадочного маневра и назначения уставок

№	X_{min}	X_{max}	$H_{зад}$	$Z_{зад}$	$\psi_{зад}$	$\Psi_{зад}$	$ \theta_{зад} $	γ_{max}
A_0	r_1	r_0	$\theta_{max} \left(r - \frac{H_{min}}{\theta_{min}} \right)$	0	0	0	θ_{max}	γ_{max}
A_1	r_2	r_1	$\theta_{max} \left(r - \frac{H_{min}}{\theta_{min}} \right)$	$\text{sign}(w) \frac{9 w + 0.68w^2}{0.1V}$	$\frac{Bw}{V}$	0	θ_{max}	γ_{max}
A_2	r_3	r_2	$\theta_{max} \left(r - \frac{H_{min}}{\theta_{min}} \right)$	0	0	$\frac{0,5w}{V}$	θ_{max}	γ_{max}
A_3	r_3	0	$\theta_{min} r$	0	0	0	θ_{min}	0

Выделенные более жирно элементы вычисляются в режиме реального времени в полете как функции текущей дальности (или высоты), скорости w бокового ветра и скорости полета V . Сам алгоритм переключения режимов полета представлен блок-схемой, показанной на рисунке 2.



Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма автоматического переключения режимов управления посадочным маневром

В четвертой главе получено решение задачи координации бокового и продольного движения с целью одновременного обнуления нужных координат по положению и скорости в точке приземления. Дело в том, что при нулевом боковом отклонении необходимости в координации пространственного движения нет, т.к. при снижении по высоте момент приземления может быть произвольным.

Однако при сильном боковом ветре необходимо использовать алгоритм синхронного изменения в разные стороны передаточных чисел регуляторов в двух каналах, с учетом отставания или опережения действий в каждом из них при следующей постановке задачи – заданы упрощенные уравнения бокового и продольного движения при линейных законах управления рулем высоты и элеронами, а также минимизируемый интегральный функционал J :

$$J_1 = \int_0^T [0,5r_0(u_1^2 + u_2^2) + nz_1y_1y_3 + r_2z_1^2 + r_1y_1^2] dt + 0,5r_3[y_1^2(T) + z_1^2(T)] \rightarrow \min.$$

Решение этой задачи проводится методом динамического программирования путем сведения к интегральному виду оптимальных членов в точке приземления:

$$0,5r_3[y_1^2(T) + z_1^2(T)] = r_3 \int_0^T (y_1\dot{y}_1 + z_1\dot{z}_1) dt.$$

Тогда уравнение Беллмана в частных производных для решения данной задачи будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \min_{u_1, u_2} \left[0,5(u_1^2 + u_2^2) + r_2 z_1^2 + r_1 y_1^2 + n z_1 y_1 y_3 + \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z_1} + r_3 z_1 \right) \dot{z}_1 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z_2} \dot{z}_2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_1} + r_3 y_1 \right) \dot{y}_1 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y_3} \dot{y}_3 \right] = \\
&= \min_{u_1, u_2} \left[0,5(u_1^2 + u_2^2) + r_1 y_1^2 + r_2 z_1^2 + n z_1 y_1 y_3 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z_1} + r_3 z_1 \right) z_2 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z_2} (-a_1 z_2 + u_1) + \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_1} + r_3 y_1 \right) y_2 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y_2} (y_3 - a_2 y_2) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y_3} (-a_3 y_3 + u_2) \right] = \min F(\bar{z}, \bar{y}, \bar{u}),
\end{aligned} \tag{6}$$

Показано, что для приближенного, но аналитического расчета нужно представить функцию Беллмана в виде степенного полинома не второго, а третьего порядка:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \varepsilon_0 + \lambda y_1 z_1 y_3 + \xi y_1 z_1 y_3 + n y_1 z_1 y_3 = \\
&= \beta_1 z_1 + 0,5 \gamma_1 z_1^2 + \beta_2 z_2 + 0,5 \gamma_2 z_2^2 + \beta_3 y_1 + \\
&\quad 0,5 \gamma_3 y_1^2 + \beta_4 y_2 + 0,5 \gamma_4 y_2^2 + \beta_5 y_3 + 0,5 \gamma_5 y_3^2 + \\
&\quad + \psi_{12} z_1 z_2 + \psi_{13} z_1 y_1 + \psi_{14} z_1 y_2 + \psi_{15} z_1 y_3 + \\
&\quad + \psi_{23} z_2 y_1 + \psi_{24} z_2 y_2 + \psi_{25} z_2 y_3 + \psi_{34} y_1 y_2 + \\
&\quad + \psi_{35} y_1 y_3 + \psi_{45} y_2 y_3 + \lambda y_1 z_1 z_2 + \xi y_1 z_1 y_3 + n y_1 z_1 y_3.
\end{aligned} \tag{7}$$

Коэффициенты этого полинома находятся стандартным путем – после вычисления частных производных $\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial z_i}, \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial y_i}$, можно составить согласно методу АКОР систему дифференциальных уравнений, соответствующих членам при одинаковых степенях вектора состояния БЛА, а затем для установившегося состояния при $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$ получить систему из 22 нелинейных алгебраических уравнений относительно искомым коэффициентов $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}, \lambda, \xi, n$ функции Беллмана, перечисленных в формуле (6) и входящих в синтезированные сигналы u_1 и u_2 оптимального управления элеронами и рулем высоты:

$$\begin{aligned}
u_1 &= -[\psi_{12} z_1 + (\gamma_2 + r_3) z_2 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2 - \lambda z_1 y_1] = \\
&= -[(\psi_{12} - \lambda y_1) z_1 + (\gamma_2 + r_3) z_2 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2] = \\
&\quad = -k_{11} z_1 - k_{12} z_2 - \psi_{23} y_1 - \psi_{24} y_2, \\
u_2 &= -[\psi_{53} y_1 + \psi_{54} y_2 + \gamma_5 y_3 + \psi_{51} z_1 + \psi_{52} z_2 - \xi z_1 y_1] = \\
&= -[(\psi_{53} - \xi z_1) y_1 + \psi_{54} y_2 + \gamma_5 y_3 + \psi_{51} z_1 + \psi_{52} z_2] = \\
&\quad = -k_{21} y_1 - k_{22} y_2 - \psi_{51} z_1 - \psi_{52} z_2.
\end{aligned} \tag{8}$$

Во-первых, формулы (8) указывают, что найденным сигналам управления соответствуют не линейные, а квазилинейные регуляторы, что принципиально важно. Во-вторых, кроме основных, выделенных более жирно, координат, интегрированное управление в «своем» канале зависит от состояния координат движения в соседнем канале.

Затем, пойдя на некоторые упрощения, удастся найти приближенное решение задачи вычисления нужных коэффициентов функции Беллмана в квадратурах, от которых зависят передаточные числа регуляторов в формулах (8):

$$\xi = \frac{n_1}{a_3 + \gamma_5}; \lambda = -\frac{\xi \psi_{52}}{a_2 + \gamma_2 + r_3}; \psi_{52} = 0,07; \psi_{53} = 0,34; \psi_{54} = -0,06;$$

$$M = a_3^2 + 2\psi_{54}; \psi_{23} = -\sqrt{1-M} = -0,93; \gamma_2 + r_3 = \sqrt{6\psi_{53} - \psi_{52}} = 1,40;$$

$$\psi_{13} = -1,46; \gamma_5 = -a_3 - \sqrt{M} = -0,86; \xi = -2,78; \lambda = 0,14; \psi_{51} = 1,37; \psi_{14} = 0,69.$$

Видно, что знаки λ и ξ таковы, что они играют роль «коромысла»: увеличение передаточного числа k_{11} в одном регуляторе сопровождается уменьшением числа k_{21} в другом, и этим обеспечивается синхронизация действий по двум каналам.

Кроме того, в работе предложено поступить так с передаточными числами не только для отклонений по положению, но и для отклонений по скорости, что привело к еще более сложному виду функции Беллмана и другой квазилинейной форме регуляторов:

$$u_1 = -[\psi_{12} + \lambda(y_1 + l|z_1|)]z_1 - [\gamma_2 + r_3 + \lambda(y_1 + l|z_1|)]z_2 - \psi_{23}y_1 - \psi_{24}y_2 - \psi_{52}y_3,$$

$$u_2 = -[\psi_{53} - \lambda(y_1 + l|z_1|)]y_1 - [\psi_{54} - \lambda(y_1 + l|z_1|)]y_2 - \psi_{51}z_1 - \psi_{52}z_2 - \gamma_5y_3. \quad (9)$$

Это позволит усилить эффект в координации управления пространственным движением БЛА при посадке.

Блок-схема трехканальной системы автоматического управления посадкой представлена на рисунке 3.

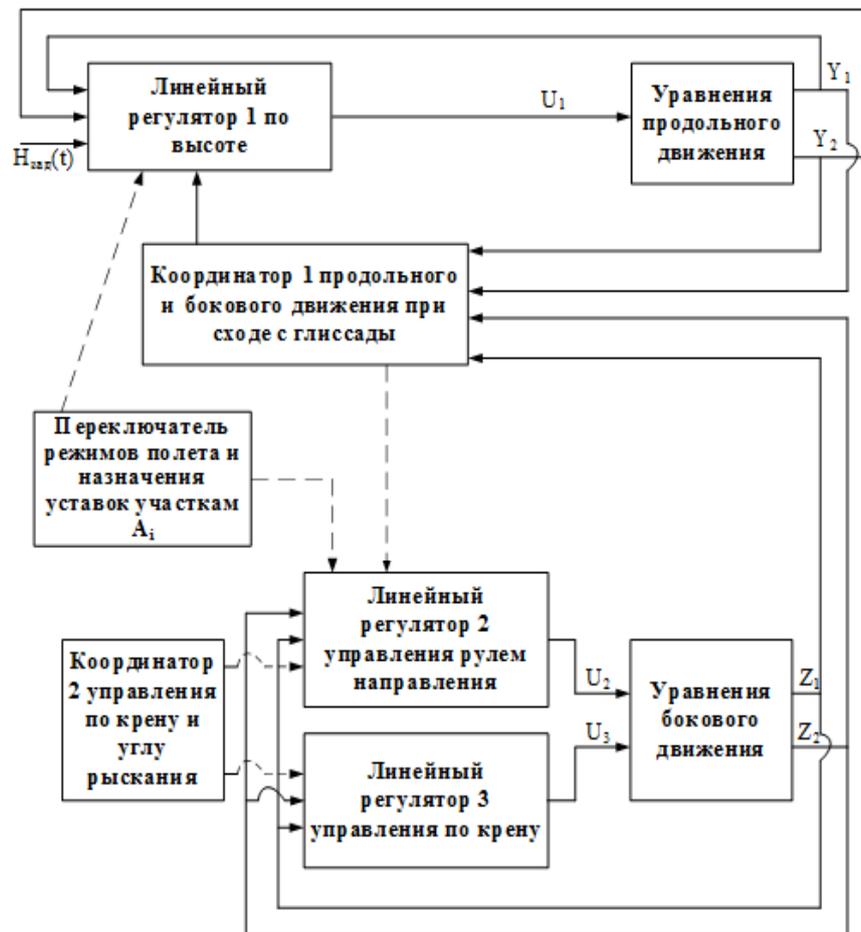


Рисунок 3 – Блок-схема трехканальной системы координированного управления посадкой при сильном боковом ветре

В пятой главе приведены результаты моделирования процесса автоматической посадки, проверенного на модели, близкой к БЛА «Орион», создаваемого компанией «Транзас». Моделирование проводилось в следующих четырех случаях:

- рассматривалось только боковое движение во время посадки при действии только бокового постоянного ветра без учета перекрестных связей между каналами крена и рысканья;

- рассматривалось то же боковое движение, что и в первом случае, а также было добавлено продольное движение по высоте, но с учетом поправок в законы управления элеронами и рулем направления;

- моделировалось движение БЛА с учетом бокового и встречного ветра;

- учитывалась турбулентность боковой, продольной и вертикальной составляющей ветра, а также вертикальные порывы.

В первом случае оказалось, что в контрольное время $t = 19\text{с}$ для точки приземления, значения угла курса и пути близки к нулю при скорости бокового ветра $w = 6\text{м/с}$, и лишь значение бокового отклонения от середины ВПП равно 1.3м .

Во втором случае при начале управления по крену в момент снижения с высоты $H_0 = 40\text{м}$ до высоты $H_2 = 28.8\text{м}$ и начале выравнивания при нулевом крене на высоте $H_B = 12\text{м}$ оказалось, что как углы пути и курса, так и отклонение от середины ВПП, близки к нулю, что может позволить совершить безопасную посадку при отсутствии чрезмерных нагрузок на шасси даже при скорости бокового ветра $w = 8\text{м/с}$ (см. рисунок 4).

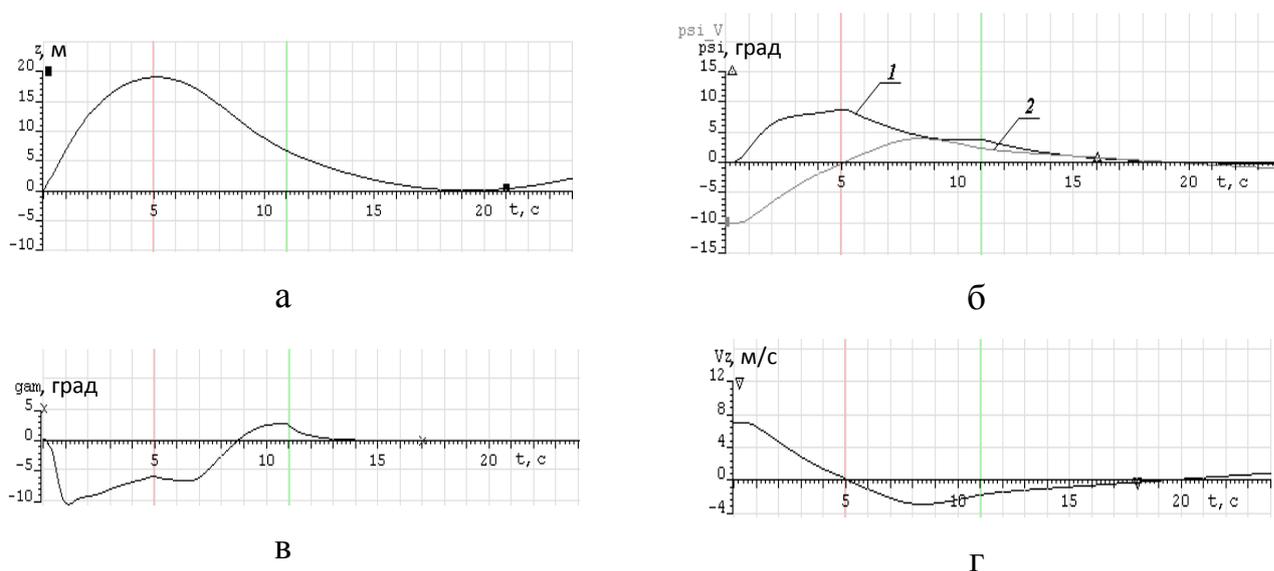


Рисунок 4, а – боковое отклонение от линии ВПП, м, б – угол курса (1) и угол пути (2), град, в – угол крена, град, г – боковая скорость, м/с

Далее, поскольку в реальных условиях редко существует только боковая составляющая ветра, было проведено моделирование с дополнительным учетом встречного ветра с такой же скоростью, что и у бокового ветра. При этом изменилось общее время выполнения маневра по сравнению с расчетным и моменты переключения между участками, что вызвало незначительное ухудшение результатов – отклонение от середины ВПП достигло 1.8м . Однако при допустимом отклонении не более 3м это не влияет на факт совершения безопасной посадки.

Наконец, в четвертом случае для проверки общности предложенного подхода по отношению к ветровому возмущению моделировалось влияние ветра с турбулентной составляющей. При учете действия только бокового ветра скоростью 8м/с вместе со случайной составляющей максимальной амплитуды 3м/с конечные результаты в точке приземления ухудшились незначительно, поэтому было проведено новое моделирование, учитывающее турбулентность не только в боковом, но и в продольном и вертикальном каналах. Сравнение результатов при величине постоянной составляющей бокового ветра $w_{\text{бок пост}} = 8\text{м/с}$ показано в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов моделирования при наличии всех составляющих ветра при $w_{\text{бок пост}} = 8\text{м/с}$

Максимальная амплитуда турбулентной составляющей	2м/с	3м/с	4м/с
z_k	1.07м	1.47м	2.1м
ψ_k	0.21°	0.45°	0.75°
Ψ_k	-0.35°	-0.45°	-0.58°

Удалось выяснить, что при максимальной амплитуде изменения случайной составляющей ветра, равной 4м/с, удалось выйти за пределы допустимых ограничений по разнице между курсовым и путевым углами: требуемое значение $|\psi_k - \Psi_k|_{\text{max}} = 1^\circ$ а данном случае $|\psi_k - \Psi_k| = 1.33^\circ$.

После этого было проведено моделирование, учитывающее помимо турбулентности всех составляющих ветра еще и случайные вертикальные порывы ветра различной амплитуды и различным средним временем между порывами.

В связи с тем, что направление вертикальных порывов являлось случайным, при нескольких прогонах для одинаковых значений скорости порыва и среднего времени между порывами, результаты оказывались различными. Тем не менее, в среднем можно сказать, что при скорости вертикальных порывов до 4м/с и времени между порывами до 5с при нескольких случайных реализациях, конечные результаты оказывались удовлетворительными. Кроме того, конечные результаты

посадки лежат в допустимых пределах и при наличии во время посадочного маневра одного или двух порывов скоростью до 15 м/с.

Результаты моделирования для случая скорости порыва 4 м/с, средним временем между порывами 10 с, при реализации двух нисходящих и одного восходящего порыва показаны на рисунке 5.

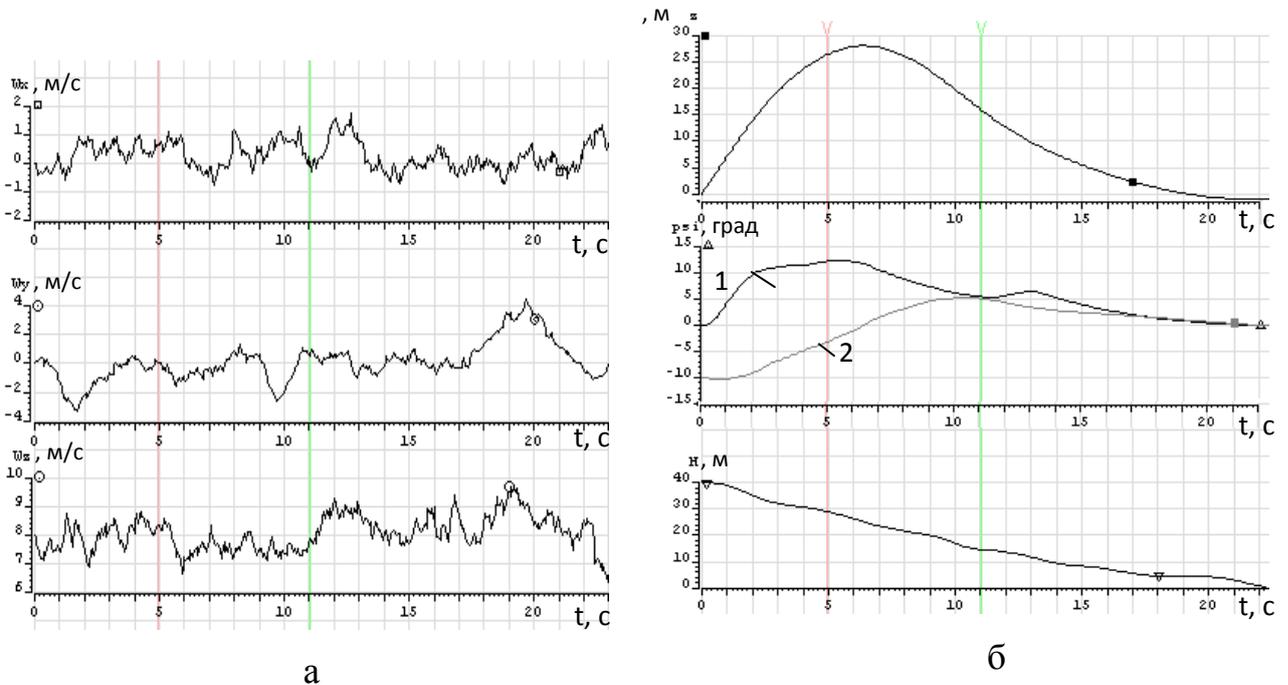


Рисунок 5 – Результаты моделирования при наличии турбулентности, а – графики изменения скорости трех составляющих ветра, б – графики изменения бокового отклонения, угла курса (1) и пути (2), высоты

Чтобы определить границы области допустимых отклонений в точке приземления, в **шестой главе** была сделана следующая попытка. Вначале был сформирован единый параметрический критерий I_k штрафов, характеризующий качество приземления и учитывающий три главных отклонения, представляющих наибольшую опасность:

$$I_k = (z_k + k_1\psi_k + k_2\Psi_k)^2, \quad (10)$$

где z – боковое линейное отклонение от середины ВПП, ψ_k – отклонение по курсу от заданной линии пути, Ψ_k – отклонение путевого угла, характеризующее боковую скорость. Отличие предложенной формулы (10) от общепринятой формы в виде суммы квадратов состоит в том, что самым неудачным сочетанием этих

отклонений является совпадение их знаков, что соответствует физическому смыслу наиболее опасного удаления БЛА от середины ВПП при его пробеге по земле после приземления.

$$L = z + k_1\psi + k_2\Psi. \quad (11)$$

В формуле (10) недоопределены весовые коэффициенты k_1 и k_2 , для вычисления которых необходимо обратиться к требованиям в техническом задании на создание БЛА по каждому показателю в отдельности. Например, при допустимом отклонении $z_k \leq 3\text{м}$, или путевого угла $\Psi_k = 1^\circ$, или курсового угла $\psi_k = 1^\circ$, получим $k_1 = 3\text{м/град}$; $k_2 = 3\text{м/град}$, при этом одновременно оценивается максимально допустимое значение единого критерия штрафов I_k :

$$I_{0k} \cong \hat{z}_k^2 = 9. \quad (12)$$

Затем после получения компактного представления качества приземления в виде одного числа I_k и его допустимого значения I_{0k} , определяющего область допустимых ошибок в точке приземления, эту область можно распространить на другой момент времени до приземления, например в точке начала выравнивания, чтобы прогнозировать безопасность полета заблаговременно, и в случае угрозы дать команду ухода на повторный круг.

Для определения новой искомой области в точке выравнивания предложено использовать найденное выше значение порога (12) следующим образом. Зная опорную траекторию бокового движения БЛА в точке выравнивания при заданной скорости бокового ветра w , зададимся по отдельности такими нежелательными отклонениями $\Delta z, \Delta\psi, \Delta\Psi$, при которых качество в момент приземления не превосходит I_{0k} . Это можно сделать в результате моделирования на ЭВМ в искусственно созданных «неудачных» начальных условиях процесса выравнивания, чего достаточно для определения параметров новой области приемлемого качества по аналогии с формулой (10) в следующем виде:

$$I_\epsilon = \left[(z - z_\epsilon)^2 + k_3(\psi - \psi_\epsilon)^2 + k_4(\Psi - \Psi_\epsilon)^2 \right] = I_{0\epsilon}, \quad (13)$$

где новые коэффициенты k_3 и k_4 доопределяются прежним способом. Оказалось, что эти коэффициенты стали соответственно меньше значений k_1 и k_2 ,

что указывает на расширение возможных ошибок движения по мере удаления от точки приземления. В частности, для БЛА были получены следующие сравнительные результаты, найденные для системы без координации действий в управлении боковым и продольным движением:

$$k_1 = 3; k_2 = 3; k_1 = 1.44; k_2 = 2.17.$$

В заключение шестой главы приведена оценка влияния координации работы каналов на область принятия решения при следующем упрощенном подходе. Дело в том, что изменение передаточных чисел регуляторов по принципу «коромысла» предписывает вмешательство в штатную аппаратуру автопилота, или КСУ – комплексную систему управления, что в настоящее время крайне нежелательно. Поэтому при моделировании использовался меняющийся угол $\theta_{\text{зад}}$ наклона траектории при выравнивании, чтобы либо отложить, либо ускорить процесс снижения. При этом внесенное изменение остается постоянным на все время выравнивания. В результате моделирования оказалось, что конечное состояние в момент приземления при координации таково, что оценка штрафа безопасности I_B уменьшилась на 25% по сравнению с управлением без координации работы каналов.

Соответственно, если построить границу новой допустимой области в точке начала выравнивания при наличии координации и без нее, как показано на рисунке б, то выигрыш по площади, характеризующий расширение возможностей посадки предложенным способом, составляет около 50%.

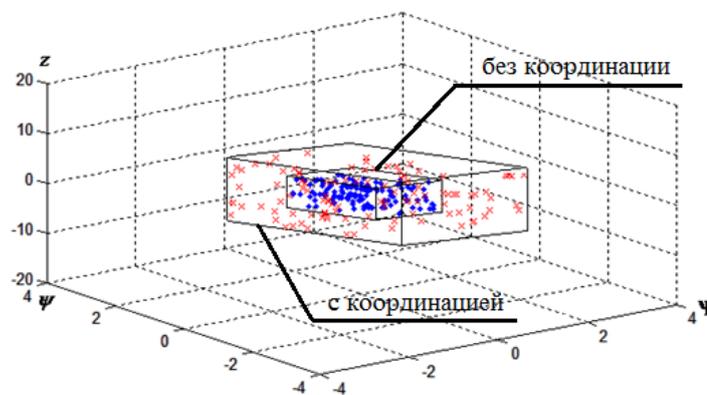


Рисунок б – Области приемлемого качества приземления без координации и с координацией работы каналов управления

Таким образом, моделирование на ЭВМ подтвердило эффективность предложенного подхода к прогнозированию безопасности посадки в точке выравнивания и полезности координации работы каналов управления на завершающем участке посадки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложен многорежимный способ выполнения посадочного маневра, состоящий в боковом канале из четырех участков: движения вдоль линии пути, с последующим уходом в попутную ветру сторону, а затем – навстречу ветру при снижении по глиссаде и управлении по крену, чтобы на конечном участке выравнивания устранить отклонения по курсу и путевому углу при управлении рулём направления.

2. Сформирован алгоритм переключения режимов полета и вычисления соответствующих уставочных значений в регуляторы в реальном времени в зависимости от скорости полета и бокового ветра.

3. С помощью динамического программирования сформулирована и решена задача оптимального координированного управления боковым и продольным движением при посадке БЛА, для чего предложено увеличивать передаточные числа по положению и скорости в одном регуляторе, одновременно уменьшая их в другом.

4. Предложен единый параметрический критерий оценки качества приземления в зависимости от отклонений по курсу, путевому углу и боковому линейному смещению относительно середины ВПП, учитывающий неудачное сочетание перечисленных параметров, а также найдена область допустимых отклонений в начальной точке выравнивания. Это позволяет прогнозировать качество приземления БЛА и в случае опасного выхода из этой области сформировать вынужденную команду ухода на повторный круг.

5. Моделирование на ЭВМ показало, что при скорости бокового ветра до 8 м/с и турбулентных составляющих ветра амплитудой до 3м/с предложенный способ обеспечивает безопасную посадку при отклонениях от середины ВПП не более 3м, по углам крена, пути и курса – не более 1 градуса. Кроме того, было установлено, что при учете дополнительного влияния вертикальных порывов ветра до 15м/с конечные отклонения в точке приземления БЛА находятся в допустимых пределах.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Лебедев Г.Н, Елисеев В.Д., Ивашова Н.Д. Постановка задачи автоматического управления посадочным маневром беспилотного летательного аппарата при сильном боковом ветре и подходы к ее решению. // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – №70.
URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php>
2. Лебедев Г.Н., Ивашова Н.Д. Координированное управление посадочным маневром при приземлении беспилотного летательного аппарата с учетом действия ветровых возмущений // Авиакосмическое приборостроение. – 2014 г. – № 4. – С.3-9
3. Ивашова Н.Д. Система автоматического управления многорежимным посадочным маневром при сильном боковом ветре // Авиакосмическое приборостроение. – 2014 г. – № 10. – С.15-21

В других изданиях:

1. Ву Суан Хыонг, Ивашова Н.Д. «Об одной задаче комплексированного управления летательными аппаратами при достижении заданной терминальной точки» //Труды XXII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» 18-24 сентября, 2013 г. Алушта. Сборник тезисов докладов, С. 13.
2. Ивашова Н.Д. «Способ повышения безопасности посадки самолета при сильном боковом ветре» //Труды XXIII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» 14-20 сентября, 2014 г. Алушта. Сборник тезисов докладов, С. 14.