

УДК 629.7.05

Программно-автоматическое управление боковым движением беспилотного летательного аппарата по ликвидации угла сноса

В.Д.Елисеев, Е.С.Белова, Е.Д.Клюев, А.В.Котельникова, В.Б.Чемоданов.

Аннотация

Рассмотрен вариант системы программно-автоматической ликвидации угла сноса. Эта система позволяет повысить точность приземления при боковом ветре за счет предварительного смещения траектории и двух заключительных разворотов на основе сигнала угла рыскания или бокового ветра.

Ключевые слова: угол сноса, боковой ветер, смещение траектории, заключительный маневр, угол рыскания, боковая перегрузка, угол скольжения, путевая скорость.

Введение

Как известно, наличие постоянного бокового ветра при посадке беспилотного летательного аппарата (БПЛА) приводит к появлению угла сноса между вектором земной скорости, определяющим направление движения центра масс ЛА (траекторию), и плоскостью симметрии ЛА, ориентированной в установившемся прямолинейном движении без крена по вектору скорости (скорости ЛА относительно воздуха) согласно векторному соотношению

$$V = V_k - W ,$$

где V_k - вектор земной скорости, W - вектор скорости ветра, V - вектор скорости (относительно воздуха).

Будем предполагать, что на некотором участке до заключительного маневра управление боковым движением происходит с помощью плоских разворотов за счет угла скольжения по сигналам системы автоматического управления (САУ).

Так как предполагается создание боковых сил только за счет угла скольжения без крена, то установившееся прямолинейное движение вдоль оси ВПП до заключительного маневра возможно только с углом сноса и равенством нулю суммы сил нормальных к оси ВПП.

Необходимость ликвидации угла сноса связана с требованием касания колесами БПЛА поверхности взлетно-посадочной полосы (ВПП) таким образом, чтобы при

нулевом крене направление плоскости симметрии БПЛА совпадало как можно точнее с вектором земной и путевой скорости для уменьшения боковых ударных нагрузок на колеса и стойки шасси. В момент касания также желательно, чтобы вектор путевой скорости был близок к направлению оси ВПП, а боковое отклонение центра масс БПЛА от этой оси было близко к нулю.

Очевидно, что заключительный маневр ликвидации сноса должен начинаться в такой момент времени, точнее, на такой высоте, когда процесс разворота плоскости симметрии самолета до требуемого положения займет столько же времени, сколько время снижения по высоте до момента касания. Это означает, что процесс ликвидации сноса должен быть дополнительно согласован по времени с процессом прогнозируемого снижения в продольном движении на конечном участке траектории посадки.

В данной работе будем предполагать, что прогнозируемое оставшееся время снижения может быть найдено из анализа продольного движения и требуется определить из анализа заключительного бокового маневра, как один из результатов, момент времени, когда должен начинаться этот маневр ликвидации сноса.

1. Анализ требований к траектории бокового движения

Требование совпадения направления плоскости симметрии (угла рыскания) с направлением путевой скорости (требование равенства нулю угла сноса) может быть выполнено при действии бокового ветра только на криволинейной траектории заключительного маневра, где при нулевом угле сноса угол скольжения и соответственно боковая сила не равны нулю.

Как известно, для ликвидации угла сноса перед моментом касания ВПП летчики отклоняют педали и создают угол скольжения, стремясь по возможности совместить направление плоскости симметрии самолета с направлением движения [1,2]. Однако в этом случае будет происходить разворот вектора скорости и боковое смещение относительно оси ВПП, что снижает точность приземления. Эти ошибки являются односторонними, соответствующими направлению бокового ветра.

При формировании системы автоматической посадки с нулевым углом сноса имеется возможность повысить точность приземления посредством более рационального согласования траектории движения вдоль оси ВПП с траекторией заключительного бокового маневра.

Для этого расположим криволинейный участок заключительной траектории (с нулевым углом сноса) так, чтобы он касался осевой линии ВПП или пересекал ее в двух

точках для располовинивания ошибок смещения. Потребуем также, чтобы предшествующий прямолинейный участок сопрягался с криволинейным посредством другого криволинейного участка с кривизной противоположного знака. Это в свою очередь требует предварительного смещения прямолинейного участка параллельно оси ВПП по направлению бокового ветра и реализации заключительного маневра, состоящего из двух участков с противоположными по знаку углами скольжения.

2. Необходимая информация и алгоритмы управления для ликвидации угла сноса

Для реализации всех участков траектории необходимо иметь информацию о величине угла сноса на участке до заключительного маневра. Для этой цели можно использовать информацию о боковом ветре или (и) о величине угла рыскания, отсчитываемого от осевой линии ВПП. Как обычно, необходима также информация о боковом смещении БПЛА относительно осевой линии ВПП.

В зависимости от величины измеряемого угла рыскания можно обеспечить требуемое боковое смещение траектории движения ЛА относительно осевой линии ВПП в режиме автоматического управления заходом на посадку на участках до заключительного маневра, если добавить сигнал пропорциональный углу рыскания к сигналам бокового смещения и скорости бокового смещения в законе управления боковой перегрузкой. Этот закон на участке, предшествующем заключительному участку может быть записан в следующем виде

$$n_{z3} = k_1 dZ/dt + k_2(Z + k_3\psi),$$

где n_{z3} - заданное (командное) значение боковой перегрузки; Z – боковое смещение; dZ/dt - скорость бокового смещения; ψ – угол рыскания; k_1, k_2, k_3 - передаточные числа.

Согласно этому закону можно получить за счет сигнала угла рыскания запланированное боковое смещение до начала заключительного маневра, так как сигнал $k_3\psi$ выступает как заданное значение бокового смещения. Так как коэффициент k_2 достаточно мал, то влияние этого сигнала на устойчивость системы оказывается незначительным.

Для автоматизации программного управления заключительным маневром должны быть созданы команды на изменения боковой перегрузки в зависимости от угла сноса, который приближенно равен углу рыскания до начала заключительного маневра. Тогда при известном и достаточно стабильном переходном процессе создания боковой перегрузки можно получать обнуление угла сноса на втором криволинейном участке заключительной траектории, при заблаговременном начале первого участка и правильном согласовании обоих участков.

Отметим, что, как обычно, при управлении траекторным движением должна использоваться в качестве внутренней подсистемы астатическая система автоматического управления боковой перегрузкой для точной отработки заданных команд и компенсации влияния возмущающих сил и моментов.

При автоматизированной реализации заключительного маневра команды на создание боковых перегрузок должны быть пропорциональны углу сноса, имевшемуся до начала этого маневра, причем на втором этапе команда должна быть противоположного знака и может быть приближенно равна по величине команде первого этапа, так как допустимые углы скольжения не зависят от знака. При программной реализации заключительного маневра оба его этапа будем реализовывать при отключенной системе стабилизации линии пути.

Для реализации обоих этапов заключительного маневра, как уже отмечалось, необходима информация об угле сноса. Так как вблизи ВПП вектор путевой скорости достаточно близок к направлению оси ВПП, то угол рыскания близок углу сноса. К началу заключительного маневра информация об угле рыскания должна быть отфильтрована и запомнена, чтобы подавать правильные величины команд боковых перегрузок на заключительном этапе. Фильтрация необходима для выделения постоянной (основной) составляющей угла сноса и уменьшении случайной быстроменяющейся составляющей, зависящей от случайных составляющих бокового ветра и измерений бокового смещения.

Фильтрацию и запоминание величины угла рыскания можно осуществить с помощью интегрирующего звена, охваченного отрицательной обратной связью. Процесс интегрирования должен прекращаться в момент начала заключительного маневра, а выход интегрирующего звена должен являться фильтрованным сигналом запомненного угла сноса ψ_{ϕ} для реализации двух этапного заключительного маневра.

Таким образом, алгоритмы заключительного маневра должны позволять обеспечивать в момент приземления совпадение и равенство нулю (при отсутствии помех, возмущений и ошибок реализации) трех координат:

бокового смещения Z , скорости бокового смещения dZ/dt (и угла пути Ψ), и угла рыскания ψ . Это должно осуществляться за счет выбора трех (или более) констант алгоритмов управления до заключительного маневра и во время его осуществления. Это - коэффициент пропорциональности k_3 сигнала угла рыскания, добавляемого к сигналу бокового смещения до заключительного маневра, величина длительности и уровень командной перегрузки первого этапа заключительного маневра (пропорциональной запомненному значению угла рыскания). Уровень командного

значения перегрузки второго этапа известен, он равен перегрузке, соответствующей составляющей угла скольжения, создаваемого боковым ветром.

Командное значение боковой перегрузки заключительного маневра запишется в виде

$$n_{z3} = k(t) \psi_{\phi}, \quad (2)$$

где переменный коэффициент $k(t)$ равен нулю до заключительного этапа, отрицателен на первом этапе и положителен на втором этапе заключительного маневра.

Предложенные алгоритмы автоматического управления до заключительного маневра и во время его осуществления были проверены моделированием соответствующей системы управления боковым движением на ПЭВМ.

3. Моделирование процессов автоматического управления боковым движением БПЛА по ликвидации угла сноса

Схема моделирования приведена на рисунке 1.

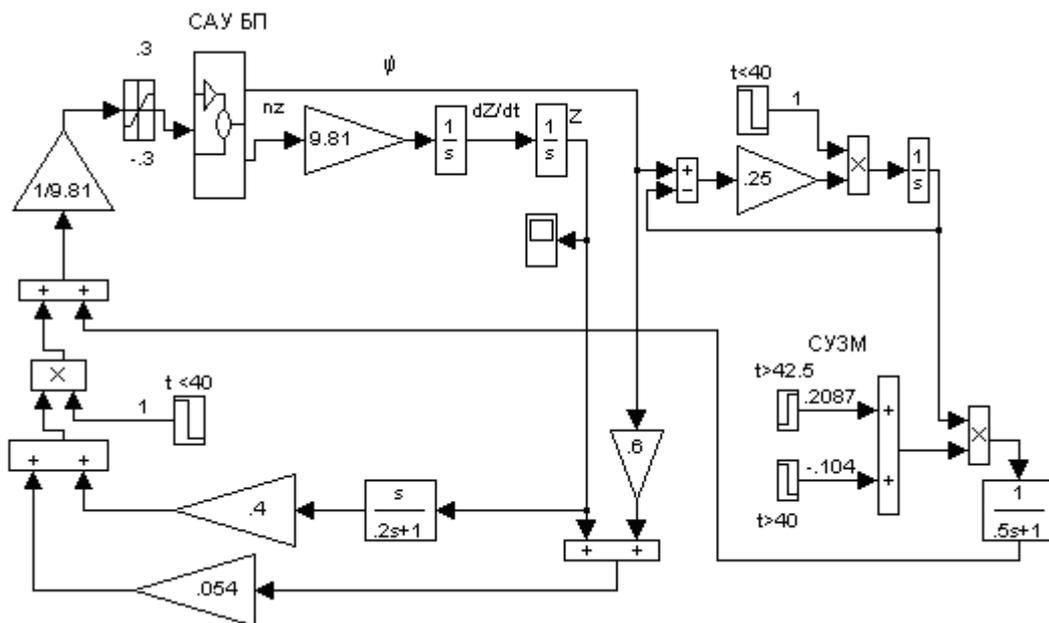


Рисунок 1. Схема моделирования бокового движения БПЛА по ликвидации угла сноса.

В качестве подсистемы на рисунке 1 имеется астатическая система автоматического управления боковой перегрузкой (САУ БП), схема моделирования которой приведена на рисунке 2. Эта система использует сигналы датчика угловой скорости (ДУС) рыскания и сигналы датчика линейных боковых ускорений (ДЛУ). Звено ограничения на рисунке 1 перед САУ БП ограничивает командные значения боковой перегрузки величинами 0,3.

Модель САУ БП содержит в качестве внутренней подсистемы модель привода (рулевой машины), структурная схема которой приведена также на рисунке 2.

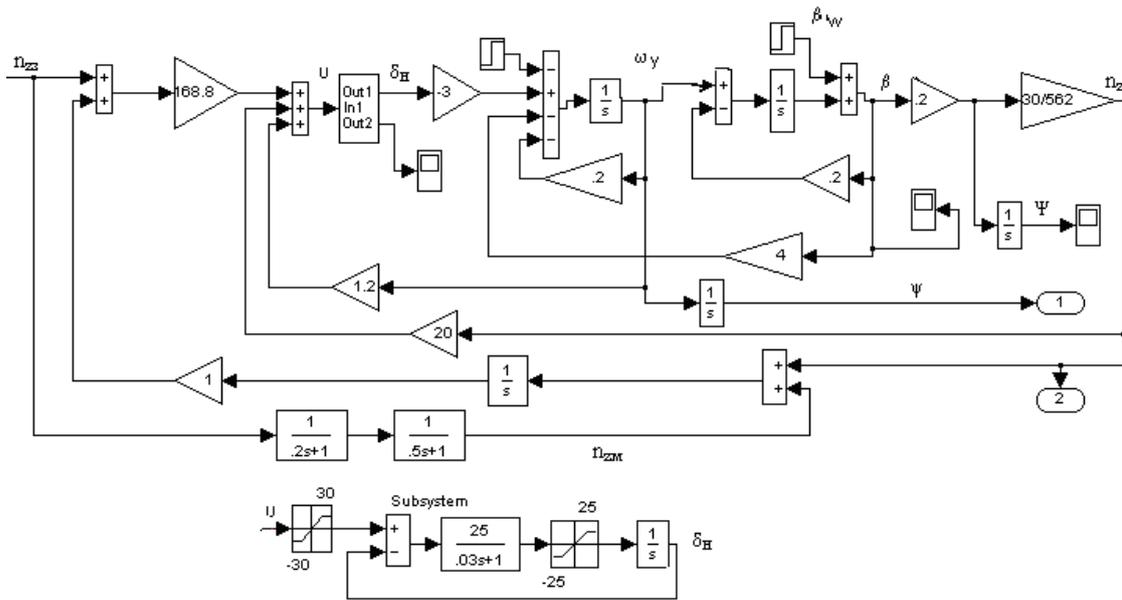


Рисунок 2. Схема моделирования системы автоматического управления боковой перегрузкой САУ БП.

Астатическая САУ БП сформирована на базе статической и ее эталонной модели с передаточной функцией

$$W_M(s) = 1/(0,2s + 1)(0,5s + 1).$$

Сигнал управления U на входе рулевой машины имеет вид

$$U = k_\omega \omega_y + k_n n_z + k_c n_{zc},$$

где $n_{zc} = n_{z3} - (k_i/s)(n_z - n_{zM})$,

$$n_{zM} = W_M(s) n_{z3}, \quad k_\omega = 1,2; \quad k_n = 20; \quad k_c = 168,8; \quad k_i = 1.$$

БПЛА описывается упрощенными дифференциальными уравнениями в преобразованиях Лапласа

$$s\beta = -0,2\beta + \omega_y;$$

$$s\omega_y = -0,2\omega_y - 4\beta - 3\delta_H;$$

$$s\Psi = 0,2\beta;$$

$$s\Psi = \omega_y;$$

$$\beta = \psi - \Psi + \beta_w; \quad n_z = 0,2 \beta * V / (9,81 * 57,3);$$

$$sZ = 9,81 n_z,$$

где n_z – боковая перегрузка, β – угол скольжения, ω_y – угловая скорость рыскания, ψ – угол рыскания, Ψ – угол пути, β_w – составляющая угла скольжения, вызванная боковым ветром (принята величиной 5 градусов), V – скорость полета (30м/с).

Модель траекторного движения относительно осевой линии ВПП приближенно представлена двумя интегрирующими звеньями на рисунке 1 с коэффициентом перехода от боковой перегрузки к боковому ускорению 9.81.

Согласно закону (1) сигнал бокового смещения Z подается в качестве одной из составляющих на создание командного значения перегрузки с коэффициентом $k_2 = 0,04/9,81$. Производная сигнала бокового смещения dZ/dt с передаточным числом $k_1 = 0,35/9,81$ поступает с реального дифференцирующего устройства (с постоянной времени 0,2). Сигнал угла рыскания ψ поступает с коэффициентом усиления $k_3 = 0,6$.

Описанная часть схемы рисунка 1 позволяет моделировать стабилизацию траектории до заключительного маневра. По сигналу прогнозируемого оставшегося времени до касания ВПП (из анализа продольного движения) эта схема стабилизации траектории отключается. В схеме рисунка 1 отключение производится на 40-ой секунде, после чего командное значение перегрузки поступает с системы управления заключительным маневром (СУЗМ).

Для СУЗМ основным сигналом является запомненный фильтрованный сигнал угла рыскания ψ_ϕ . Этот сигнал поступает на апериодическое звено в виде интегрирующего звена, охваченного отрицательной обратной связью с коэффициентом в прямой цепи 0,25. Запоминание осуществляется за счет размыкания прямой цепи на 40-й секунде, когда отключается система траекторного управления.

Запомненное значение угла рыскания ψ_ϕ запускает на 40-й секунде схему СУЗМ, которая формирует программное значение командной перегрузки n_{z3} . Оно равно на первом этапе заключительного маневра значению $- 0,104\psi_\phi/9,81$ до 42.5 секунды, а затем значению $0,2087\psi_\phi/9,81$ после 42.5 секунды.

На рисунках 3, 4 приведены процессы изменения бокового смещения Z , угла пути Ψ и угла рыскания ψ при такой скорости бокового ветра W , которая приводит к составляющей угла скольжения, равной пяти градусам ($W = 2,6\text{м/с}$). Все эти величины с высокой точностью близки к нулю на 46 секунде. Следовательно, прогнозируемое оставшееся время, с которого должен начинаться заключительный маневр, равно 6 секундам. При этом допускается возможность ошибки в оценке этого времени до одной

секунды (~20%) и в плюс и в минус. В этом случае величины бокового смещения не превысят значений 0,2 метра, а величины углов ψ , Ψ практически равны, что свидетельствует о том, что угол сноса близок нулю.

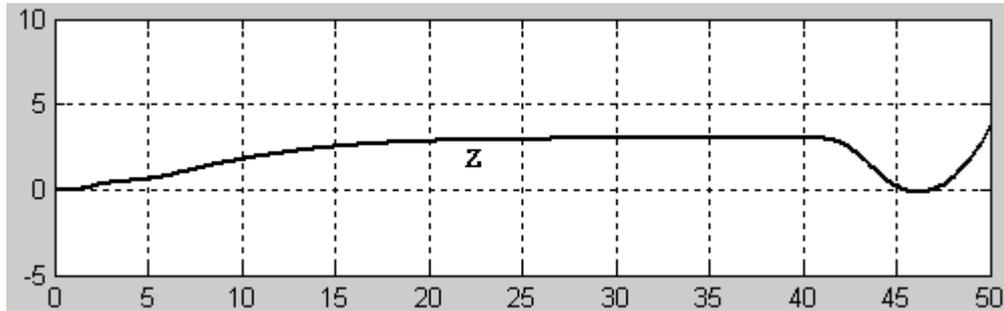


Рисунок 3. Боковое смещение БПЛА (Z).

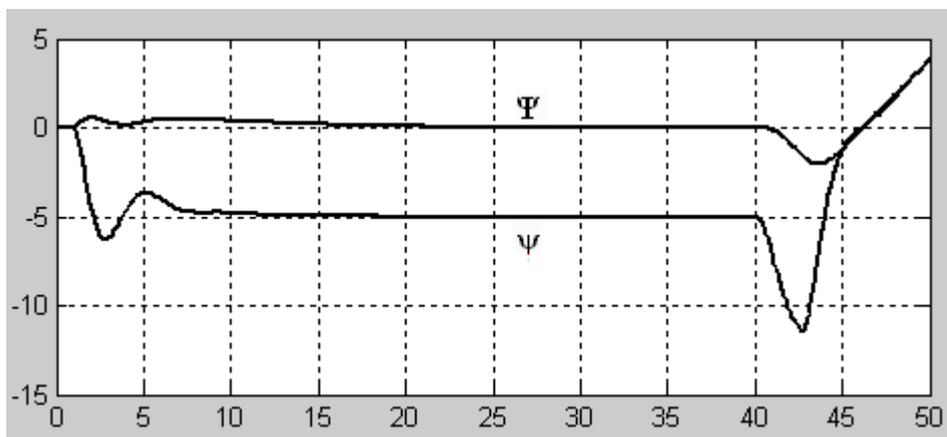


Рисунок 4. Угол пути Ψ и угол рыскания ψ .

На рисунке 5 приведены процессы изменения угла скольжения β . Как и для других процессов ветровое воздействие задано через одну секунду после начала моделирования. Как видно, максимальные значения угла скольжения не превышают 5 градусов.

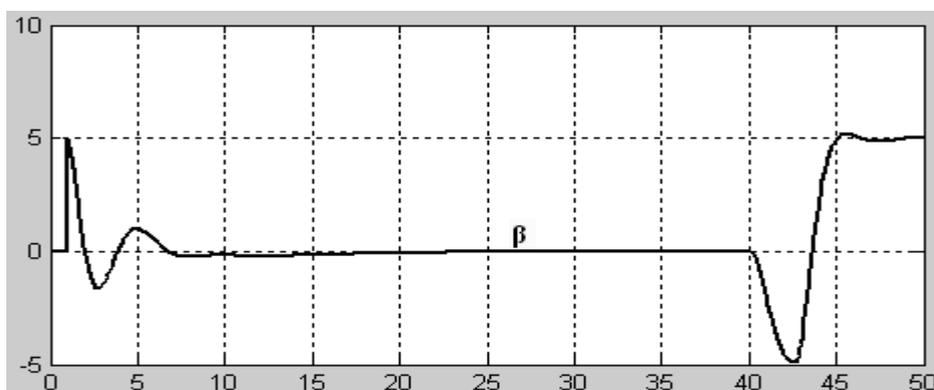


Рисунок 5. Угол скольжения β .

Заключение

Полученные алгоритмы управления боковым движением показывают теоретическую возможность обеспечения равенства нулю в момент касания ВПП трех координат: бокового смещения, скорости его изменения и угла рыскания при наличии высокоточной информации об оставшемся времени снижения БПЛА до касания ВПП.

Алгоритмы допускают возможность обеспечения нулевого угла сноса и при ошибках оценки оставшегося времени до 20% от реального значения. При этом ошибки бокового смещения и направления движения не являются односторонними, что позволяет уменьшить их максимальные значения.

Библиографический список

1. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чикулаев М.С. Системы автоматической посадки.- М.: Машиностроение, 1975.-216с.
2. Галлай М.Л., Особенности пилотирования реактивных самолетов. – М.: Издательство ДОСААФ, 1962. – 183с.

Сведения об авторах:

Елисеев Валерий Дмитриевич, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н., тел.. 8-916-629 78-40.

Белова Евгения Семеновна, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н., тел. 8-499-243-65-23.

Клюев Евгений Дмитриевич, научный сотрудник Института машиноведения РАН, тел.8-915-168-24-96.

Котельникова Анна Валерьевна. инженер Московского авиационного института (государственного технического университета), тел. 8-916-67-699-50.

Чемоданов Владимир Борисович. доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н., тел. 8-916-672-71-09.