

УДК 629.08.120

Логика комплексированного терминального управления летательным аппаратом с помощью линейного и релейного регуляторов

Лебедев Г.Н.* , Ву С.Х. **

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

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

***e-mail: vuxuanhuong1984@gmail.com*

Аннотация

Рассматриваются две системы терминального управления летательными аппаратами: посадка самолета на шасси и причаливания дирижабля к мачте. При одинаковых требованиях по быстродействию и точности выявлена общая логика переключения регуляторов с учетом знаков отклонений по положению и скорости.

Ключевые слова: самолет, дирижабль, логика, терминальная точка, оптимальное управление, линейный, релейный, регулятор, причаливание, посадка

Введение

При управлении летательными аппаратами различного класса (ЛА) особое место занимают задачи их наведения в терминальную точку. С позиций метода вариационного исчисления они делятся на задачи с закрепленными и подвижными концами. Более распространен случай, когда

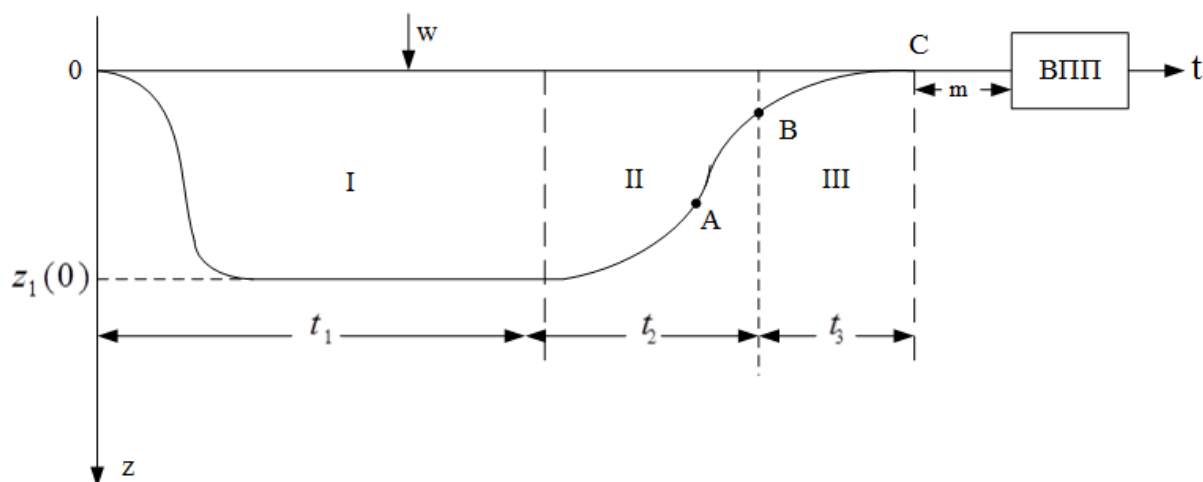
часть координат не закреплена, либо она удовлетворяет заданным ограничениям.

К ним относятся рассмотренные в данной работе задачи посадки самолета в заданную точку взлётно-посадочной полосы (ВПП), что особенно важно при малой допустимой длине пробега, и также причаливания дирижабля к мачте с нулевой конечной скоростью.

Ниже представлены постановки обеих задач и общая логика их решения при повышенном быстродействии терминального управления.

1. Постановка задачи посадки беспилотного летательного аппарата (БЛА) на шасси

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.

2. Продольное(вертикальное) движение в данной работе подробно не рассматривается, а 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 [1]:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 = V \sin(\beta - \varphi) + w \\ \dot{\omega}_y = a_{22}\omega_y + a_{23}\beta + b_{21}U_2 \\ \dot{\beta} = a_{32}\omega_y + a_{33}\beta + a_0\beta|\beta| + b_{31}U_2 \\ \dot{\varphi} = \omega_y \end{cases} \quad (2)$$

где z_1 – координата бокового пути; z_2 – скорость бокового движения; ω_y – угловая скорость вращения относительно вертикальной оси; β – угол скольжения; φ – угол рыскания; U_2 – сигнал управления боковым движением; 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.

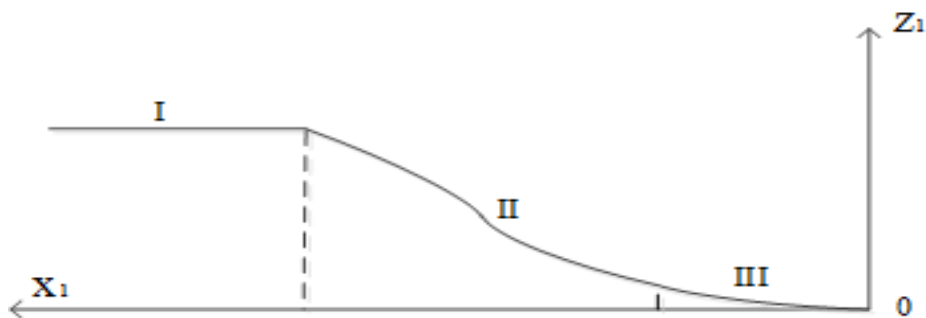
Требуется:

– 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.

2. Постановка задачи причаливания дирижабля к мачте

1. Управление дирижаблем осуществляется по двум каналам, продольному за счет изменения тяги двигателя и изменения скорости вращения гребного винта, и боковому путем изменения положения руля,



чтобы обеспечить движение дирижабля по траектории, примерный вид которой показан на рис. 2.

Рис. 2. Примерный вид траектории причаливания, на которой участок I – исходное движение к заданной точке А с максимальной скоростью; участок II – сближение к мачте с максимальным быстродействием; участок III – движение приближение к заданной терминальной точке $x_1 = z_1 = 0$

2. Продольное движение дирижабля описывается дифференциальными уравнениями[1]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = V \cos(\beta - \varphi) + w_1 \\ \dot{V} = -\rho x_2^2 + x_3 \\ \dot{x}_3 = -a_1 x_3 + b_1 U_1 \end{cases} \quad (3)$$

где x_1 – координата продольного пути; x_2 – скорость продольного движения; V – скорость дирижабля; w_1 – продольное возмущение; ρ – коэффициент лобового сопротивления; x_3 – ускорение, возникающее под действием управления U_1 тягой двигателя; β – угол скольжения; φ – угол рыскания; a_1, b_1 – заданные динамические коэффициенты.

Управление U_1 тягой двигателя на участке I таково, что скорость V в установившемся режиме достигает своего максимального значения V_{\max} , и, согласно уравнениям (3), это управление при $\dot{x}_3 = \dot{x}_2 = w_1 = 0$ равно:

$$U_{1\max} = \frac{a_1 \rho V_{\max}^2}{b_1}$$

На участке II управление релейное, и поэтому максимальное значение $U_1 = \delta_1$, где $\delta_1 < U_{1\max}$ – заданная величина.

На участке III управление дирижаблем желательно иметь таковым, чтобы обеспечить равнозамедленное движение:

$$x_2 \approx V_{\max} - a_0 t$$

где a_0 – некоторое заданное значение, определяющее темп торможения.

3. Боковое движение подчиняется следующим дифференциальными уравнениям (2), для которых принято допущение, что креном дирижабля можно пренебречь.

4. Критериями оптимальности движения дирижабля являются:

- на участке I решается задача максимального быстродействия;
- на участке III решается задача высокоточного движения по заданной траектории при следующих интегральных функционалах качества соответственно в продольном и боковом каналах [2]:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \int_0^{t_k} [r_0 U_1^2 + r_1 (x_1 - m_1)^2 + r_2 (x_2 - V_{1m})^2] dt \rightarrow \min \\
 J_2 &= \int_0^{t_k} [r_0 U_2^2 + r_1 (z_1 - m_2)^2 + r_2 (z_2 - V_{2m})^2] dt \rightarrow \min
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где m_1 и m_2 – заданные линии завершающего пути причаливания; V_{1m} и V_{2m} – заданные продольная и боковая скорости сближения с конечной точкой; r_0, r_1, r_2 – заданные весовые коэффициенты штрафов.

– на участке II осуществляется переменная стратегия управления, логику которой необходимо выбрать, в основном стремясь к максимальному быстродействию по одному из каналов и высокоточному – по другому.

Требуется:

– синтезировать законы релейного и линейного управления для каналов продольного и бокового движения дирижабля;

– определить логику компенсированного попеременного использования двух способов управления, чтобы, с одной стороны, за минимальное время приблизиться к месту причаливания и, с другой, — безошибочно попасть в заданную терминальную точку.

3. Выбор структуры законов линейного и релейного управления продольным и боковым движениям

Рассмотрим вначале процесс релейного управления, характерный для участков I и II. Согласно принципу максимума Понтрягина [3] для продольного канала можно записать правило для управления продольным движением, если упрощенно представить уравнение (3) в виде динамической системы второго порядка:

$$U_1 = -\delta_1 \operatorname{sign} \left[x_1 - m_1 + \frac{x_2 |x_2|}{2\delta_1} \right] \quad (5)$$

Для бокового движения при том же упрощении можно записать:

$$U_2 = -\delta_2 \operatorname{sign} \left[z_1 - m_2 + \frac{(z_2 + w_2) |z_2 + w_2|}{2\delta_2} \right] \quad (6)$$

Линейное управление может быть реализовано с помощью оптимального регулятора, синтезированного на основе метода динамического программирования [4] с помощью аналитического конструирования оптимальных регуляторов [5]. В частности, если также допустить описание бокового движения в виде системы второго порядка:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1^* &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= -a_2 z_2 + b_2 U_2 \end{aligned}$$

где координата $z_1^* = z_1 - m_2$, $z_2 = x_2 \sin \psi$; a_2, b_2 – некоторые эквивалентные динамические параметры, то можно получить структуру линейного регулятора, как это сделано в частности, в [5]:

$$U_2 = -[K_1(z_1 - m_2) + K_2(z_2 - V_{2m})] + K_3 \varphi + K_4 \beta + K_5 w_2 \quad (7)$$

Можно заметить, что управление, пропорциональное ошибкам по положению, скорости и углам, является общепринятым в инженерной практике.

Аналогично можно записать формулу для линейного управления продольным движением:

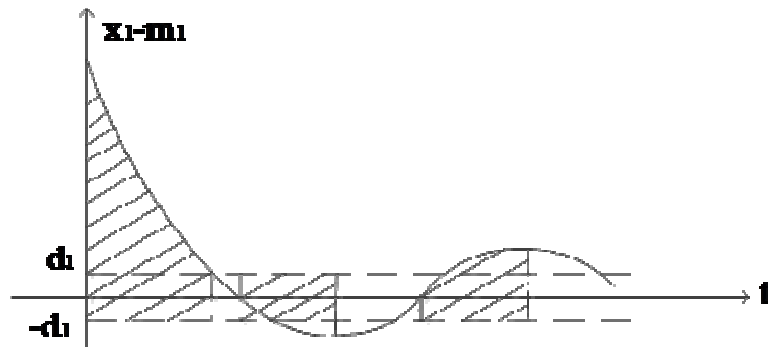
$$U_1 = -[K_1(x_1 - m_1) + K_2(x_2 - V_{1m})] \quad (8)$$

Представленные в формулах (5 – 8) значения m_1, m_2, V_{1m}, V_{2m} требуют уточнения, а также K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 - заданные при моделировании коэффициенты.

4. Выбор логики переключения релейного и линейного регуляторов при комбинированном управлении

Очевидно, что релейное управление целесообразно для отработки значительных отклонений от заданной терминальной точки. Ясно, что на участке III нужно более осторожное линейное управление, и обычно эта область определяется в пространстве координат z_1 и x_1 .

В данной работе предложен иной подход к определению этой области, учитывающий ещё и скорости приближения z_2 и x_2 , что можно пояснить с

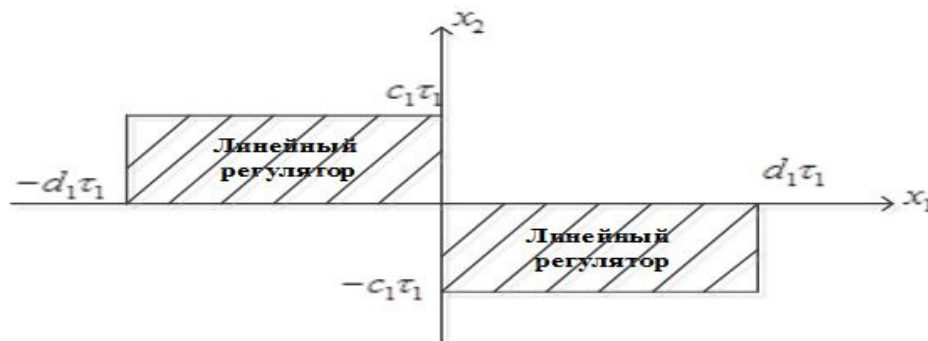


помощью рис.3.

Рис. 3. График переходного процесса изменения ошибки приближения к точке A при продольном движении

На изображенном рисунке показанная пунктиром полоса в интервале $[d_1, d_2]$ соответствует малым отклонениям по положению, а внутри этой

полосы – заштрихованные участки, когда отклонения по положению и по скорости имеют одинаковый знак, и поэтому представляют наибольшую



опасность.

В связи с этим на указанных участках предлагается использовать релейное управление вместо линейного и лишь на незаштрихованных участках – линейное управление, чему соответствуют следующие области переключения, показанные на рис. 4 в фазовой плоскости $[x_1, x_2]$. Эти области характерны для решения задачи посадки самолета.

Рис. 4. Области переключения релейного регулятора продольного движения на линейный в фазовой плоскости (x_1, x_2)

Границы области $c_1\tau_1, d_1\tau_1$, в которой просматривается очевидное несоответствие между реальной динамикой объекта и системой второго порядка, должны быть уточнены. Значение дополнительного множителя τ_1 будет объяснено ниже, а пока пусть $\tau_1 = 1$.

Что касается бокового движения дирижабля для координат $z_1 - m_2$ и z_2 , то кроме очевидных границ $c_2\tau_2$ и $d_2\tau_2$ нужно учесть то усугубляющее обстоятельство, что из-за невозможности опасного приближения к мачте до подхода к точке причаливания и ограничения $z_1 > 0$ (значение дополнительного множителя τ_2 также будет пояснено ниже, а пока пусть в

данных рассуждениях $\tau_2 = 1$) нужно как можно энергичней (то есть релейным способом) от него удалиться. В связи с этим нужно назначить одну область линейного управления вместо двух, как это показано на рис. 5. Эта область характерна для задачи причаливания дирижабля.



Рис. 5. Сокращенная область переключения релейного регулятора бокового движения на линейный в фазовой плоскости $(z_1 - m_2, z_2)$

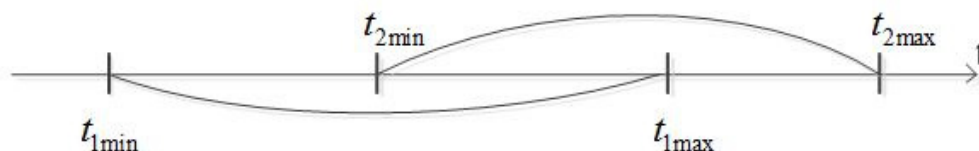
На рисунке вместо прямоугольника появилась сторона трапеции 1, уменьшающая возможности линейного управления при опасном сближении с точкой А. Границы области в виде параметров $l, c_2\tau_2, d_2\tau_2$ также должны быть уточнены.

5. Логика контроля согласованности по времени выполнения операций управления боковым и продольным движениям

При несогласованном управлении боковым и продольным движениями может получиться так, что одна из двух координат z_1 и x_1 может достигнуть нуля, а другая в этом момент – нет, что потребует дополнительного маневрирования. Поэтому целесообразно оценить время t_1 обнуления координаты x_1 при продольном движении, время t_2 обнуления координаты z_1 при боковом движении, а затем по разности $\Delta t = t_1 - t_2$ установить, нужно ли

ускорить движение по одной из координат с помощью релейного управления, или в этом необходимости нет.

Однако сравнение времен t_1 и t_2 затруднительно из-за того, что их спрогнозированная оценка является неточной в первую очередь из-за того, что эти времена зависят от способа управления. Если управление релейное, то это соответствует минимальными значениям $t_{1\min}$ и $t_{2\min}$, если линейное – то $t_{1\max}$ и $t_{2\max}$. Тогда безоговорочно очевидными могут быть ситуации:



1. $t_{1\min} > t_{2\max}$ – продольное движение отстает. Значит, необходимо релейное управление, от линейного управления нужно отказаться, и поэтому нужно взять $\tau_1 = 0$, чтобы ликвидировать области, показанные на рис. 3. С другой стороны, в боковом канале спешить не нужно, поэтому имеет смысл использовать только линейное управление т.е. $\tau_2 = \infty$.
2. $t_{2\min} > t_{1\max}$ – боковое движение отстает, поэтому по аналогии с предыдущими рассуждениями нужно потребовать $\tau_2 = 0, \tau_1 = \infty$.

В остальных более вероятных случаях интервалы $[t_{1\min}, t_{1\max}]$ и $[t_{2\min}, t_{2\max}]$ пересекаются, как это показано, в частности, на рис. 6 для случая $t_{1\min} < t_{2\min} < t_{1\max}$.

Рис. 6. Пример неопределенности в принятии решений о выборе способов управления боковым и продольным движениями

В этих случаях логику согласованных действий стоит оставить соответствующей тем областям линейного управления, которые показаны на

рис. 4 и рис. 5, т.е. нужно взять $\tau_1 = \tau_2 = 1$. Логика согласования действий можно реализовать с помощью показанной на рис. 7 структуры.

Рис. 7. Структуры принятия альтернативных решений по выбору способов управления боковым и продольным движениями

Для реализации этой логики нужно иметь формулы расчета времени $t_{1\min}, t_{1\max}, t_{2\min}, t_{2\max}$. Времена $t_{1\min}$ и $t_{2\min}$ соответствуют релейному управлению при равноускоренном движении, когда заданы ограничения δ_1 и δ_2 на допустимые постоянные ускорения. Нетрудно показать, что в этом случае при текущих координатах положения и скорости в продольном и боковом каналах нужно воспользоваться формулами:

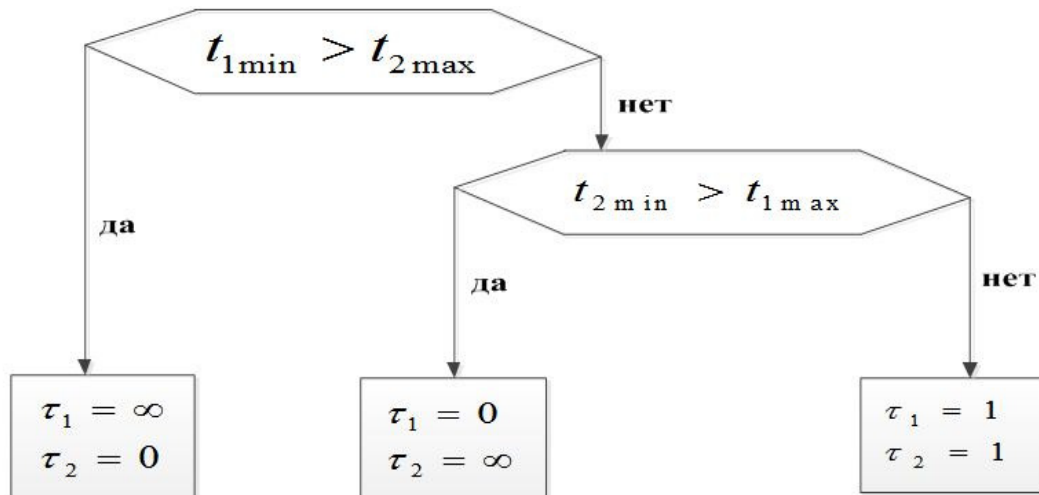
для бокового канала

$$0.5\delta_2 t_{2\min}^2 - z_2 x_2 t_{1\min} + z_1 = 0$$

для продольного канала

$$0.5\delta_1 t_{1\min}^2 - x_2 t_{1\min} + x_1 = 0 \quad (8)$$

Что касается времён $t_{1\max}, t_{2\max}$ для движения с линейным управлением,



то их оценка весьма затруднительна в аналитической форме, и поэтому в первом приближении их можно взять вдвое больше, чем $t_{1\min}$ и

соответственно $t_{2\min}$. Последующее уточнение должно быть проведено в результате моделирования на ЭВМ.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложена структура системы терминального управления повышенного быстродействия, содержащая логическую и исполнительную часть.

Логическая часть содержит блок оценки оставшегося времени полета, осуществляющий координированное управление по боковому и продольному каналам, и два логических анализатора, следящих за совпадением по знаку отклонений по положению и скорости в каналах бокового и продольного движения.

Исполнительная часть содержит два линейных и два релейных регулятора, из которых первая пара – используется для осторожного и мягкого причаливания, а вторая пара – для повышения быстродействие отработки значительных отклонений.

2. Полученное техническое решение применимо для управления как дирижаблями, для которых важно сократить время приближения к заданной терминальной точке, так и самолетами при посадке в сложных подобных условиях.

Библиографический список

1. Лукомский Ю.А., Корчанов В.М. Управление морскими подвижными объектами. С.-П.: Элмор. 1996.- 318 с.

2. Гришанин Ю.С., Лебедев Г.Н., Липатов А.В., Степаньянц Г.А. Теория оптимальных систем. М.: МАИ. 1999.- 317 с.

3. Понтрягин Л.С. Принцип максимума в оптимальном управлении. М.: Наука. 1989.- 62с.

4. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: ИИЛ. 1961. 400 с.

5. Летов А.М. Математическая теория процессов управления. М.: Наука. 1981.- 255 с.

6. Лебедев Г.Н., Ву С.Х. Задача синтеза алгоритма максимального по быстрдействию автоматического причаливания речного судна в заданной точке. // Электронный журнал “ Труды МАИ ”, 2013, № 63.

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