ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ВОЗВРАЩАЕМОГО АППАРАТА ПИЛОТИРУЕМОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ ПРИПОСАДКЕ НА ПОСАДОЧНОЙ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

И.С. ИЛЬЮЩЕНКО, *инженер-математик ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева,*
Л.А. ИЛЬЮЩЕНКО, *МФТИ (ГУ)*

ilivs@mail.ru, oasis93@mail.ru
ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева
Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, д. 4А
Московский физико-технический институт (ГУ)
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

В настоящее время в ОАО ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королева разрабатывается пилотируемый транспортный корабль нового поколения в рамках федеральной космической программы взамен ныне существующего «Союз ТМА». В возвращаемом аппарате (ВА) этого корабля предусмотрена парашютно-реактивная посадка на Землю, устраняющая недостатки парашютно-реактивной посадки «Союз ТМА», в т.ч.:

– большой разброс точки посадки при штатном спуске из-за большой высоты ввода парашютной системы (ПС), порядка (10,7 + 0,5) км, в отличие от планируемой высоты ввода ПС для пилотируемого транспортного корабля (ПТК) НП, порядка (4,5 + 0,5) км;

– невозможность компенсации горизонтальной скорости и управления угловым движением вокруг центра масс, что зачастую приводит к опрокидыванию спускаемого аппарата «Союз ТМА» на боковую поверхность, что исключает использование его корпуса для повторного полета.

Данная работа представляет собой исследование в области создания алгоритма управления парашютно-реактивной системой (ПРС) ВА ПТК с целью выполнения требований к параметрам для штатного срабатывания средств приземления.

Парашютно-реактивная система состоит из двух подсистем: самой ПС и посадочной твердотопливной двигательной установки (ПТДУ):

– парашютная система предназначена для снижения скорости возвращаемого аппарата до заданных значений на минимально необходимом перепаде высот, угловой стабилизации ВА;

– посадочная твердотопливная двигательная установка предназначена для создания силовых и моментных воздействий на ВА в процессе посадки для обеспечения: 1) гашения вертикальной и горизонтальной (ветровой) составляющих установившейся скорости движения ВА на парашютной системе; 2) управления движением относительно центра масс ВА; 3) выполнения требований к условиям на момент первого касания грунта по линейным и угловым скоростям, угловому положению ВА.

Ключевые слова: космос, возвращаемый аппарат, средства приземления, посадка

В данной статье был выстроен алгоритм управления парашютно-реактивной посадкой ВА ПТК НП для обеспечения безударного касания земной поверхности, что является одним из главных требований к средствам приземления ВА ПТК НП для обеспечения его многоразовости.

Для решения поставленной задачи, необходимо:

– выдать разовую команду на включение ПТДУ;

– выдать разовую команду на отстрел парашютов;

– определить постоянный уровень требуемой суммарной тяги и стабилизировать соответствующее давление в ПТДУ, управляя суммарной площадью критических сечений всех сопел в соответствии с алгоритмом разработчиков ПТДУ;

– дифференцированно управлять критическими сечениями восьми основных и четырех дополнительных сопел ПТДУ для создания требуемых тяг и моментов с целью гашения скорости ВА и приведения его в требуемое угловое положение к моменту касания грунта;

– по касанию вскрыть клапаны гашения тяги и закрыть все сопла ПТДУ.

Математическое построение аналитического решения

Математическая постановка решаемой задачи

Перед включением ПТДУ при спуске возвращаемого аппарата на парашюте измеряются следующие параметры движения ВА:

– высота ВА над посадочной площадкой H,

– скорость снижения ВА V_B,

– боковая скорость ВА $V_Г$.

Высота и скорость снижения ВА измеряются и в процессе работы ПТДУ.

Требуется средствами ПТДУ одновременно погасить скорость снижения и боковую скорость на момент касания посадочной площадки, то есть при достижении $H = H_K$ должно быть $V_B = V_{BK}$ и $V_Г = V_{ГК}$ (без учета методических погрешностей алгоритма и возмущающих факторов), где

H_K – расчетная высота (показания высотомера) на момент касания,

V_{BK} – расчетная скорость снижения при касании,

$V_{ГК}$ – расчетная боковая скорость при касании.

Далее будут использоваться следующие обозначения для искомых величин:

H_0 – высота включения ПТДУ,

R – суммарная сила тяги вдоль осей всех сопел ПТДУ,

R_8 – суммарная сила тяги вдоль осей восьми основных сопел,

R_4 – суммарная сила тяги вдоль осей четырех дополнительных сопел.

Принципы построения алгоритма гашения скорости

В описываемом ниже алгоритме решения задачи используются следующие параметры, которые считаются известными:

M – масса ВА ПТК НП,

g – ускорение свободного падения,

φ – угол отклонения осей основных сопел от продольной оси ВА,

α – угол отклонения осей дополнительных сопел от поперечной плоскости ВА.

Построение алгоритма основано на аналитическом решении модельной задачи о равноускоренном движении материальной точки постоянной массы под действием постоянного гравитационного ускорения и постоянной (как по величине, так и по направлению) тяги. Влияние парашюта после включения ПТДУ, отклонения посадочной площадки от горизонтальной плоскости, отклонения продольной оси ВА от вертикали и ошибки ориентирования ВА дополнительными соплами против боковой скорости не учитываются.

Вертикальная W_B и горизонтальная $W_Г$ составляющие полного ускорения выражаются в этом случае формулами

$$W_B = \frac{R_8 \cos\varphi + R_4 \sin\alpha}{M} - g\,,\ W_Г = \frac{R_4 \cos\alpha}{M}\,.$$

Обозначив через оставшееся до касания время, из условия гашения на момент касания скорости снижения получим

$$V_B - V_{BK} = W_B T.$$

А из условия гашения на момент касания боковой скорости получим

$$V_Г - V_{ГК} = W_Г T.$$

Откуда следует равенство

$$(V_Г - V_{ГК})\, W_B = (V_B - V_{BK})\, W_Г.$$

Используя выписанные выражения для компонент полного ускорения, получим уравнение, связывающее тяги R_4 и R_8. Поскольку имеется второе уравнение, которое связывает R_4 и R_8 суммарной тягой $R = R_4 + R_8$, целесообразно выразить R_4 и R_8 через R

$$R_4 = (V_Г - V_{ГК})\frac{R\cos\varphi - Mg}{(V_B - V_{BK})\cos\alpha + (V_Г - V_{ГК})(\cos\varphi - \sin\alpha)},$$

$$R_8 = R - R_4 = \frac{(V_B - V_{BK})R\cos\alpha + (V_Г - V_{ГК})(Mg - R\sin\alpha)}{(V_B - V_{BK})\cos\alpha + (V_Г - V_{ГК})(\cos\varphi - \sin\alpha)}.$$

Выражения для горизонтальной $W_Г$ и вертикальной W_B составляющих полного ускорения после подстановки в них этих формул для R_4 и R_8 принимают вид

$$W_Г = (V_Г - V_{ГК})\frac{R\cos\varphi/M - g}{(V_B - V_{BK}) + (V_Г - V_{ГК})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha},$$

$$W_B = (V_B - V_{BK})\frac{R\cos\varphi/M - g}{(V_B - V_{BK}) + (V_Г - V_{ГК})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}.$$

Для времени T, соответственно, получим:

$$T = \frac{(V_B - V_{BK}) + (V_Г - V_{ГК})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{R\cos\varphi/M - g}.$$

Само условие касания (достижения расчетной высоты касания H_K через время T) имеет вид

$$H_0 - V_B T + \frac{W_B T^2}{2} = H_K.$$

Исключая T из условия гашения скорости снижения при касании до расчетной, получим

$$V_B^2 - V_{BK}^2 = 2W_B(H_0 - H_K).$$

Что приводит к уравнению, связывающему высоту с суммарной тягой

$$H_0 - H_K = \frac{1}{R\cos\varphi/M - g}\frac{V_B^2 - V_{BK}^2}{2}\left(1 + \frac{V_\Gamma - V_{\Gamma K}}{V_B - V_{BK}}\frac{\cos\varphi - \sin\alpha}{\cos\alpha}\right).$$

Выписанные формулы относятся к задаче гашения скорости снижения и боковой скорости с помощью заранее выбранной тяги и ее распределения на основные и дополнительные сопла за один этап.

Рассмотрим теперь на этой основе задачу гашения скорости снижения и боковой скорости за два этапа: на первом этапе вся тяга создается только основными соплами (для «прослабления» строп парашюта), а дополнительные сопла подключаются на втором этапе (временем, требующимся для перераспределения тяги, пренебрегаем).

Обозначим:

H_1 – высота в момент перераспределения тяги;

V_1 – расчетная скорость снижения при перераспределении тяги;

T_1 – продолжительность первого этапа;

T_2 – продолжительность второго этапа;

$T = T_1 + T_2$ – время от включения ПТДУ до касания.

Тогда для первого этапа, на котором боковая скорость не гасится, получим

$$T_1 = \frac{V_B - V_1}{R\cos\varphi/M - g},\quad H_0 - H_1 = \frac{1}{R\cos\varphi/M - g}\frac{V_B^2 - V_1^2}{2},$$

аналогично, для второго этапа имеем

$$T_2 = \frac{(V_1 - V_{BK}) + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{R\cos\varphi/M - g},$$

$$H_1 - H_K = \frac{1}{R\cos\varphi/M - g}\frac{V_1^2 - V_{BK}^2}{2}\left(1 + \frac{V_\Gamma - V_{\Gamma K}}{V_1 - V_{BK}}\frac{\cos\varphi - \sin\alpha}{\cos\alpha}\right).$$

Складывая полученные формулы, получим выражение для времени от включения ПТДУ до касания и искомую формулу для высоты включения ПТДУ

$$T = \frac{(V_B - V_{BK}) + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{R\cos\varphi/M - g},$$

$$H_0 - H_K = \frac{(V_B^2 - V_{BK}^2) + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(V_1 + V_{BK})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{2(R\cos\varphi/M - g)}.$$

Формулировка алгоритма гашения скорости при посадке на ПТДУ

Алгоритм включения ПТДУ

В соответствии с описанными выше принципами команда на включение ПТДУ должна выдаваться при выполнении условия

$$H \le H_0 = H_K + \frac{(V_B^2 - V_{BK}^2) + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(V_1 + V_{BK})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{2(R\cos\varphi/M - g)} + V_B\tau,$$

где R – задаваемый уровень суммарной тяги (при этом $R_4 = 0$, $R_8 = R$);

τ – расчетное время задержки исполнения при наборе тяги.

Уровень суммарной тяги R должен выбираться с учетом того, чтобы в момент включения ПТДУ высота ВА измерялась с достаточной точностью (точность измерения высоты растет с уменьшением высоты, а высота включения ПТДУ уменьшается с увеличением тяги). Зафиксированные на момент включения величины скорости снижения и боковой скорости далее обозначаются соответственно как V_B и V_Γ.

Алгоритм перераспределения тяги

Требующиеся величины тяг на втором этапе определяются выражениями

$$R_4 = (V_\Gamma - V_{\Gamma K})\frac{R\cos\varphi - Mg}{(V_1 - V_{BK})\cos\alpha + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(\cos\varphi - \sin\alpha)},$$

$$R_8 = R - R_4.$$

Постоянный уровень суммарной тяги R (общий для обоих этапов) должен выбираться с учетом того, чтобы рассчитанное по этим формулам распределение тяги на основные и дополнительные сопла было физически реализуемо и чтобы тяга через основные сопла оставалась достаточно большой для обеспечения управления ориентацией ВА. Перераспределение тяги должно начинаться при выполнении условия $V \le V_1$ или при выполнении условия

$$H \le H_1 = H_K + \frac{(V_1^2 - V_{BK}^2) + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(V_1 + V_{BK})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{2(R\cos\varphi/M - g)} + V_1\tau_1,$$

либо если время от включения ПТДУ превысило величину

$$t = \frac{V_B - V_1}{R\cos\varphi/M - g} + \tau - \tau_1,$$

где τ_1 – расчетное время задержки при перераспределении тяги.

Алгоритм отключения ПТДУ

Вскрытие клапанов гашения тяги и закрытие всех сопел ПТДУ должно производиться по касанию грунта или при выполнении условия $V \le V_K$.

Так как вариант с поддержанием достигнутой расчетной скорости снижения (в том числе вариант с зависанием) невозможен, поскольку тяговооруженность ВА значительно больше единицы даже при минимально допустимой тяге ПТДУ.

Введенные при формулировке алгоритма положительные константы должны выбираться по результатам моделирования.

Задача управления ориентацией ВА при посадке на ПТДУ

Посадочная площадка считается плоской, но может иметь наклон по отношению к местной горизонтальной плоскости. В процессе работы ПТДУ измеряются положение нормали к посадочной площадке и вектор угловой скорости ВА. Измерения производятся в связанном с ВА базисе, орт $\vec{e}_x$ которого направлен вдоль продольной оси ВА в сторону днища; перпендикулярный ему орт $\vec{e}_y$ направлен в сторону противоположную тяги дополнительных сопел, а орт $\vec{e}_z$ дополняет базис до правого. Далее считаются измеряемыми следующие параметры по трем каналам углового движения ВА.

По каналу тангажа:

ϑ_z – угол поворота вокруг $\vec{e}_z$, совмещающего орт проекции на плоскость XY нормали к посадочной площадке с ортом $\vec{e}_x$;

ω_z – Z-компонента вектора угловой скорости ВА.

По каналу курса (рыскания):

ϑ_y – угол поворота вокруг $\vec{e}_y$, совмещающего орт проекции на плоскость XZ нормали к посадочной площадке с ортом $\vec{e}_x$;

ω_y – Y-компонента вектора угловой скорости ВА.

По каналу крена:

ω_x – X-компонента вектора угловой скорости ВА.

Требуется средствами ПТДУ одновременно уменьшать углы и угловые скорости по всем трем каналам углового движения так, чтобы на момент касания отклонение продольной оси ВА от нормали к посадочной площадке и величины угловых скоростей не превышали заданных ограничений. По каналу крена ВА должен быть перед включением развернут в требуемое положение, задача изменения этого положения в процессе работы ПТДУ не ставится (требуется только гасить угловую скорость по крену).

Необходимо управлять угловым движением путем создания чистых моментов сил по всем трем каналам за счет дифференцированных поправок к тяге основных сопел ПТДУ. Далее будут использоваться следующие обозначения для искомых величин:

δR_z – поправка к тяге по каналу тангажа,

δR_y – поправка к тяге по каналу курса,

δR_x – поправка к тяге по каналу крена.

Принципы создания управляющих моментов ПТДУ

Создание управляющего момента по одному каналу углового движения (тангажа, курса или крена) обеспечивается за счет перераспределения расхода продуктов сгорания твердого ракетного топлива между четырьмя соплами путем изменения критического сечения каждого сопла без изменения суммарной площади критических сечений данной четверки сопел. Считается, что суммарная тяга вдоль осей всех сопел ПТДУ зависит только от суммарной площади критических сечений всех сопел ПТДУ, тяга каждого сопла прямо пропорциональна площади его критического сечения, а площадь критического сечения сопла прямо пропорциональна управляющему сигналу, выдаваемому СУДН в соответствующий электропривод.

Для создания управляющих моментов используются только восемь основных сопел ПТДУ, расположенных на боковой поверхности ВА под углом φ к продольной оси X ВА. Указанные 8 сопел образуют четыре пары. Линии действия тяг сопел каждой пары параллельны, что позволяет создавать чис-

тый момент сил путем увеличения силы тяги одного сопла с одновременным уменьшением на ту же величину силы тяги другого сопла пары. Векторы чистых моментов каждой из четырех пар проходят под углом φ к поперечной плоскости *YZ* ВА, причем два из них лежат в продольной плоскости *XY* ВА (I–III), а два других – в продольной плоскости *XZ* ВА (II–IV). Комбинируя моменты двух пар в плоскости *XZ*, можно получить чистый управляющий момент сил вокруг оси *Z* (по тангажу) или вокруг оси *X* (по крену). Аналогично, комбинируя моменты двух пар в плоскости *XY*, можно получить чистый управляющий момент сил вокруг оси *Y* (по курсу) или вокруг оси *X* (по крену). Таким образом, восьмерка основных сопел разбивается на тангажную и курсовую четверки, причем дополнительно с помощью каждой из этих четверок может осуществляться управление по каналу крена. Из-за наличия заметного возмущающего момента по тангажу (так называемого эксцентриситета тяги из-за смещения центра масс от продольной оси геометрической симметрии ВА в направлении оси *Y*) целесообразно использовать для создания управляющего момента по крену курсовую четверку сопел как основную, а тангажную четверку как дополнительную.

Рассмотрим связь между величиной поправки к тяге δR и величиной создаваемого момента сил *M* по каналу тангажа или курса. В результате сложения двух векторов (составляющих угол φ с требуемым направлением и симметрично расположенных относительно него) моментов одинаковой величины M_2 от двух пар сопел соответствующей четверки, получим, что $M = 2\,M_2 \cos\varphi$. Величина момента M_2, создаваемого парой сопел, равна произведению известного расстояния между линиями действия тяг сопел *D* на величину изменения тяги сопла δR относительно среднего уровня тяги используемой четверки сопел $M_2 = D\,\delta R$. В результате имеем $\delta R = M / 2\,D \cos\varphi$.

Аналогичная формула для канала крена отличается только заменой в знаменателе cosφ на sinφ.

В принципе имеется возможность создания чистого момента сил и с помощью четырех дополнительных сопел ПТДУ. Но расстояния между линиями действия тяг в парах дополнительных сопел в несколько раз меньше, а направление создаваемого момента не позволяет использовать его для управления в канале крена без создания возмущающего момента в канале курса. Кроме того, отказаться от управления по крену с помощью основных сопел все равно нельзя, поскольку дополнительные сопла работают не все время; кроме того, гашение угловой скорости по крену может потребоваться и при отсутствии боковой скорости, когда дополнительные сопла вообще не используются.

Принципы построения алгоритма угловой стабилизации

В описываемом ниже алгоритме решения задачи используются следующие параметры, которые считаются известными:

J_x – центральный момент инерции ВА ПТК НП вокруг оси *X*,

J_y – центральный момент инерции ВА ПТК НП вокруг оси *Y*,

J_z – центральный момент инерции ВА ПТК НП вокруг оси *Z*.

Управление угловым движением производится по трем каналам, взаимосвязи между которыми при построении алгоритма управления не учитываются.

Построение алгоритма стабилизации по каналам тангажа и курса основано на решении задачи стабилизации по углу ϑ и угловой скорости ω с помощью управляющего момента сил *M* для модельной системы уравнений углового движения (*J* − момент инерции для соответствующего канала)

$$\dot{\vartheta} = \frac{d\vartheta}{dt} = \omega\,,\ \ddot{\vartheta} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J}.$$

Приведение из начального положения в начало координат фазовой плоскости ($\vartheta = 0$, $\dot{\vartheta} = 0$) с помощью постоянного момента *M* в общем случае невозможно. Учитывая требование гладкой и простой зависимости момента от угла и угловой скорости, будем строить управление в виде

$$M = -k_\vartheta \vartheta - k_\omega \omega,$$

где k_ϑ и k_ω – постоянные коэффициенты обратной связи по углу и угловой скорости.

В результате рассматриваемые уравнения движения для одного канала управления угловым движением сводятся к одному линейному дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами

$$\ddot{\vartheta} + \frac{k_\omega}{J}\dot{\vartheta} + \frac{k_\vartheta}{J}\vartheta = 0.$$

Это уравнение не имеет в общем случае решения, приводящего за конечное время в начало координат фазовой плоскости, но имеет устраивающее нас решение, представляющее собой при выполнении условий:

$$k_\omega > 0 \text{ и } k_\vartheta > k_\omega^2/4J.$$

Данное решение представляет собой затухающий колебательный процесс, сходящийся к положению с нулевым углом и угловой скоростью

$$\vartheta = e^{-\lambda t}\left(\vartheta_0 \cos\Omega t + \frac{\lambda\vartheta_0 + \omega_0}{\Omega}\sin\Omega t\right),$$

$$\omega = e^{-\lambda t}\left(\omega_0 \cos\Omega t + \frac{\lambda\omega_0 + (\Omega^2 + \lambda^2)\vartheta_0}{\Omega}\sin\Omega t\right),$$

где

$$\lambda = k_\omega/2J,\ \Omega = \sqrt{\frac{k_\vartheta}{J} - \lambda^2}.$$

Чтобы процесс имел требуемые частоту и коэффициент затухания, коэффициенты обратной связи по углу и угловой скорости должны быть следующими

$$k_\vartheta = J(^2 + \lambda^2),\ k_\omega = 2J\lambda.$$

Выбирая

$$\lambda = \Omega = \pi/2T_0,$$

где T_0 – характерное время процесса, получим:

$$\vartheta\big|_{t=T_0} = e^{-\frac{\pi}{2}}\left(\vartheta_0 + \frac{2}{\pi}\omega_0 T_0\right),\ \omega\big|_{t=T_0} = e^{-\frac{\pi}{2}}\left(\omega_0 + \frac{\pi}{2}\frac{\vartheta_0}{T_0}\right).$$

Выбранные параметры обеспечивают достаточно эффективное гашение начальных отклонений по углу ϑ_0 и угловой скорости ω_0 (за счет масштабного множителя $e^{-\pi/2} \approx 0{,}135$) и отсутствие перерегулирований (за счет того, что характерное время процесса составляет четверть периода колебаний). В качестве времени T_0 целесообразно использовать оценку времени от включения ПТДУ до касания грунта.

Алгоритм стабилизации по каналу крена можно попытаться построить на основе имеющегося решения задачи гашения угловой скорости ω до нуля с помощью постоянного управляющего момента сил M для модельного уравнения углового движения (J – момент инерции)

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J}.$$

Обозначив через T оставшееся до гашения угловой скорости время, получим выражение для требующегося момента сил

$$M = (-J/T)\ \omega,$$

которое вырождается при $T \to 0$. Поэтому, с учетом требования гладкой и простой зависимости момента от угловой скорости, будем строить управление в виде

$$M = -k_\omega\omega,$$

где k_ω – постоянный коэффициент обратной связи по угловой скорости.

В этом случае дифференциальное уравнение движения

$$\omega + (k_\omega/J)\ \omega = 0$$

имеет при $k_\omega > 0$ устраивающее нас затухающее решение

$$\omega = \omega_0 e^{-\lambda t},\ \text{где } \lambda = k_\omega/J.$$

Выбирая (тот же, что и для других каналов) параметр:

$$\lambda = \pi/2T_0,$$

где T_0 – характерное время процесса, получим

$$\omega\big|_{t=T0} = \omega_0 e^{-\pi/2}.$$

То есть достаточно эффективное гашение начальной угловой скорости по крену. В качестве времени T_0 здесь также целесообразно использовать оценку времени от включения ПТДУ до касания грунта.

Формулировка алгоритма угловой стабилизации

Алгоритм стабилизации по тангажу

В соответствии с описанными выше принципами поправка к тяге по каналу тангажа вычисляется следующим образом. Сначала вычисляется оценка требуемой поправки к тяге

$$\delta R_z^* = \frac{-k_{\vartheta_z}\vartheta_z - k_{\omega_z}\omega_z - M_e}{2D\cos\varphi},\ k_{\vartheta_z} = \frac{\pi^2 J_z}{4T_0^2},\ k_{\omega_z} = \frac{\pi J_z}{T_0},$$

$$T_0 = \frac{(V_B - V_{BK}) + (V_\Gamma - V_{\Gamma K})(\cos\varphi - \sin\alpha)/\cos\alpha}{R\cos\varphi/M - g},$$

$$M_e = Y_T R_8 \cos\varphi.$$

Здесь помимо обратной связи по углу и угловой скорости в явном виде компенсируется момент сил, вызванный эксцентриситетом тяги R_8 основных сопел, Y_T – известное смещение центра масс ВА от оси симметрии расположения основных сопел ПТДУ. Время T_0 вычисляется по величинам вертикальной V_B и горизонтальной V_Γ составляющих скорости ВА, зафиксированных к моменту выдачи команды на включение ПТДУ. Если вычисленная оценка поправки к тяге δR_z^* допустима, то она и задается как требующаяся поправка к тяге по каналу тангажа δR_z. Если вычисленная оценка поправки к тяге δR_z^* нереализуема, то вычисляется максимально допустимая поправка того же знака, что и δR_z^*, которая и берется в качестве требующейся поправки к тяге по каналу тангажа δR_z.

Ограничение на допустимую величину поправки к тяге связано с тем, что для ее реализации необходимо в двух соплах тангажной четверки увеличить критические сечения, а в двух других – уменьшить на ту же величину относительно средней площади критического сечения основных сопел. В зависимости от средней площади критического сечения основных сопел (зависящей от суммарных тяг R_4 и R_8 основных и дополнительных сопел) рассматриваемое ограничение достигается, когда два сопла тангажной четверки полностью закрываются или когда два других сопла полностью открываются.

Алгоритм стабилизации по курсу

Оценка требуемой поправки к тяге по каналу курса вычисляется аналогично соответствующей оценке для канала тангажа, но без учета поправки на эксцентриситет тяги, поскольку центр масс ВА расположен в плоскости XY (без учета разброса)

$$\delta R_y^* = \frac{-k_{\vartheta_y}\vartheta_y - k_{\omega_y}\omega_y}{2D\cos\varphi},\ k_{\vartheta_y} = \frac{\pi^2 J_y}{4T_0^2},\ k_{\omega_y} = \frac{\pi J_y}{T_0}.$$

Если вычисленная оценка поправки к тяге δR_y^* допустима, то она и задается как требующаяся поправка к тяге по каналу курса δR_y. Если вычисленная оценка поправки к тяге δR_y^* нереализуема, то вычисляется максимально допустимая поправка того же знака, что и δR_y^*, которая и берется в качестве требующейся поправки к тяге по каналу курса δR_y.

Ограничение на допустимую величину поправки к тяге связано с тем, что для ее реализации необходимо в двух соплах курсовой четверки увеличить критические сечения, а в двух других – уменьшить на ту же величину относительно средней площади критического сечения основных сопел. В зависимости от средней площади критического сечения основных сопел (зависящей от суммарных тяг R_4 и R_8 основных и дополнительных сопел) рассматриваемое ограничение достигается, когда два сопла курсовой четверки полностью закрываются или когда два других сопла полностью открываются.

Алгоритм стабилизации по крену

Оценка требуемой поправки к тяге по каналу крена вычисляется с учетом отсутствия обратной связи по углу и изменившегося угла между векторами моментов от пар сопел

$$\delta R_x^* = \frac{-k_{\omega_x}\omega_x}{2D\sin\varphi},\ k_{\omega_x} = \frac{\pi J_x}{T_0}.$$

Если вычисленная оценка поправки к тяге δR_x^* допустима, то она и задается как требующаяся поправка к тяге по каналу крена δR_x. Если вычисленная оценка поправки к тяге δR_x^* нереализуема, то вычисляется максимально допустимая поправка того же знака, что и δR_x^*, которая и берется в качестве требующейся поправки к тяге по каналу крена δR_x.

При расчете ограничения на допустимую величину поправки к тяге здесь необходимо учитывать следующие обстоятельства. В качестве основной четверки сопел для управления по крену используется курсовая четверка. Для создания управляющего момента по крену необходимо в двух соплах курсовой четверки увеличить критические сечения, а в двух других уменьшить по сравнению с теми значениями, которые рассчитаны из условия обеспечения требуемой суммарной тяги и требуемой поправки к тяге по каналу курса. Но из тех двух сопел, в которых нужно уменьшить критическое сечение для создания момента по крену, и тех двух сопел, в которых нужно уменьшить критическое сечение для создания момента по курсу, одно будет об-

щим. Аналогично, при распределении тяги по соплам курсовой четверки для одновременного создания моментов по курсу и крену в одном из четырех сопел придется увеличить критическое сечение как за счет требуемой поправки по каналу курсу, так и за счет рассчитываемой поправки по каналу крена. В зависимости от средней площади критического сечения основных сопел и требуемой курсовой поправки к тяге δR_y ограничение на величину дополнительной поправки к тяге для создания момента по крену курсовой четверкой достигается, когда одно сопло курсовой четверки полностью закрывается или полностью открывается. Если это ограничение достигнуто, то дополнительно для создания управляющего момента по крену задействуется тангажная четверка, для которой имеется аналогичное ограничение. Вычисленная оценка поправки к тяге δR_x^* считается нереализуемой, если исчерпаны возможности увеличения чистого момента соответствующего знака по каналу крена с использованием как курсовой, так и тангажной четверок сопел.

Библиографический список

1. Брюханов, Н.А. На смену славно потрудившемуся «Союзу» / Н.А. Брюханов. // Инженерная газета «Индустрия», август 2009. – № 25–26. – С. 1491–1492.
2. Ильющенко, И.С. Постановка задачи стабилизации возвращаемого аппарата типа «фара» при спуске в атмосфере Земли / И.С. Ильющенко, Л.А. Денисова. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. –2013. – № 2. – С. 179–182.
3. Охоцимский, Д.Е. Основы механики космического полета / Д.Е. Охоцимский, Ю.Г. Сихарулидзе. – М.: Наука, 1990. – 448 с.
4. Айзерман, М.А. Классическая механика / М.А. Айзерман. – М.: Наука, 1980. – 368 с.
5. Александров, С.Г. Советские спутники и космические корабли / С.Г. Александров, Р.Е. Федоров. – М.: АН СССР, 1961 – 440 с.
6. Келдыш, М.В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика / М.В. Келдыш. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
7. Охоцимский, Д.Е. Алгоритм управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев, Ю.Г. Сихарулидзе – М.: Наука, 1975. – 400 с.
8. Охоцимский, Д.Е. К теории движения тела с полостями, частично заполненными жидкостью / Д.Е. Охоцимский // Прикладная математика и механика. – 1956. – Т. 20. – № 1. – С. 3–20.
9. Сихарулидзе, Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов / Ю.Г. Сихарулидзе – М.: Наука, 1982. – 352 с.
10. Чуркин В.М. Динамика связанных тел в задачах движения парашютных систем / О.В. Рысев, А.А. Вишняк, В.М. Чуркин, Ю.Н. Юрцев – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.

BUILDING CONTROL ALGORITHM OF REENTRY VEHICLE MANNED TRANSPORT VEHICLE AT LANDING ON A LANDING SOLID-FUEL PROPULSION SYSTEM

Il'yushchenko I.S., S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia»; **Il'yushchenko L.A.,** Moscow Institute of Physics and Technology

ilivs@mail.ru, oasis93@mail.ru

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», 4A Lenin Street, Korolev, Moscow area, 141070, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Currently, the JSC Rocket and Space Corporation Energia named after S. P. Korolev is developing a manned transport spacecraft of a new generation within the framework of the Federal space program instead of the current «Soyuz TMA». The RV of this spacecraft is provided with the parachute-rocket landing on Earth, which solves the problems of the parachute-rocket landing of the «Soyuz TMA»:

– large scatter of landing points at normal descent caused by the high altitude input of PS, approximately of (10,7 + 0,5) km, in contrast with the proposed height of PS input for MTS NG, approximately of (4,5 + 0,5) km;

– inability to compensate of the horizontal velocity and angular motion control around the mass centers, which often leads to the overturning of the descent vehicle «Soyuz TMA» on the lateral surface, which eliminates the use of his body for re-flight.

This work is a research in the field of the control algorithm parachute-rocket system (PRS) of the reentry vehicle (RV) of the manned transport spacecraft (MTS) in order to comply with the parameters for normal operation means of landing.

The parachute-rocket system consists of two subsystems: the parachute system (PS) and solid-fuel propulsion system (SFPS):

– the parachute system is designed to reduce the speed of the reentry vehicle to the assigned values at the minimum required vertical drop, RV angular stabilization;

– landing solid-fuel propulsion system is designed to produce power and torque effects on the RV during landing in order to achieve:

– extinction of the vertical and horizontal (wind) components of steady speed at the RV with the parachute system,

– motion control relatively to the center of the RV mass;

– compliance to the conditions at the time of first contact with the ground on linear and angular velocity, the angular position of the RV.

Keywords: space, reentry vehicle, landing arrangements, landing.