

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ярошевский В.А. Движение неуправляемого тела в атмосфере. М.: Машиностроение, 1978.
2. Дорошин А.В. Моделирование движения спускаемого аппарата с частичной закруткой как системы соосных тел с упругой осью // Сб. трудов IX Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов, Самара, 1999, Ч. I, с. 64-67.
3. Механика. Новое в зарубежной науке. Задачи стабилизации составных спутников. Под редакцией Белецкого В.В. М.: Мир, 1975.
4. Нейштадт А.И., Пивоваров М.Л. Переход через сепаратрису в динамике спутника с двойным вращением // Прикладная математика и механика, 2000, Т. 64, Вып. 5.
5. Асланов В.С., Дорошин А.В. Свободное движение системы соосных тел с малой динамической асимметрией // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Пермь, 2001, с. 55.

УДК 629.78

Заболотнов Ю.М., Репухов С.А.

АНАЛИЗ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЕРВЫХ СТУПЕНЕЙ И БОКОВЫХ БЛОКОВ ПОСЛЕ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

В работе анализируются особенности пассивного движения ступеней и боковых блоков после их отделения от ракеты-носителя (РН). При исследовании рассматривается полная математическая модель движения твердого тела, включающая в себя уравнения движения центра масс и вокруг центра масс отделяемой части (ОЧ) РН.

Численные методы расчета применяются совместно с приближенными методами, позволяющими найти условия возникновения резонансов в движении ОЧ. Появление резонансов, обусловленных малой динамической и аэродинамической несимметрией ОЧ, приводит к

возрастанию углов атаки, угловых скоростей (авторотации) и, как следствие, к возможности ее разрушения и резкому возрастанию площадей районов падения фрагментов ОЧ.

1. Вопросы исследования движения ОЧ РН имеют важное значение при проектировании и эксплуатации ракетной техники, так как они связаны со стремлением уменьшить площади районов падения ОЧ. При решении данной проблемы можно выделить следующие задачи:

- 1) анализ возможности возникновения резонансных явлений в динамике движения ОЧ;
- 2) определение условий возникновения резонансной и нерезонансной закрутки ОЧ;
- 3) исследование возможности движения ОЧ на балансировочных углах атаки с неизменным направлением вектора подъемной силы;
- 4) оценка перегрузок, возникающих при различных режимах движения ОЧ и возможности их разрушения на фрагменты;
- 5) исследование неуправляемого движения несимметричных фрагментов;
- 6) оценка рассеивания точек падения ОЧ и их фрагментов;
- 7) разработка пассивных и активных способов стабилизации движения ОЧ

РН.

В данной работе основное внимание уделяется первой задаче.

2. Система уравнений движения ОЧ РН, используемая для численных расчетов, имеет следующий вид:

$$I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z = M_x, \quad (1)$$

$$I_y \frac{d\omega_y}{dt} + (I_x - I_z)\omega_x\omega_z = M_y, \quad (2)$$

$$I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y = M_z, \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = \omega \times n, \quad \frac{dm}{dt} = \omega \times m, \quad \frac{dl}{dt} = \omega \times l, \quad (4)$$

$$\frac{dr}{dt} = \mathcal{V}, \quad \frac{d\mathcal{V}}{dt} = \frac{R}{m} + g, \quad (5)$$

где Охуз – главная связанная система координат (СК);

I_x, I_y, I_z – главные осевые моменты инерции;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты угловой скорости ОЧ;

i, j, l – единичные вектора (орты) главной связанной СК;

r, V – радиус вектор и скорость ОЧ в геоцентрической СК;

m – масса ОЧ;

g – вектор гравитационного ускорения,

R – вектор аэродинамической силы,

M_x, M_y, M_z – компоненты аэродинамических моментов, действующих на ОЧ в атмосфере.

Система уравнений (1-5) при соответствующем задании входящих в нее сил и моментов является наиболее полной моделью движения твердых тел в атмосфере, она не имеет особенностей при значениях пространственного угла атаки $\alpha_n = 0, \frac{\pi}{2}, \pi$ и применяется как для статистического моделирования движения, так и для проверки точности различных приближенных решений, условий и оценок.

3. Анализ возможности возникновения резонансных явлений непосредственно по системе уравнений (1-5) затруднен, так как в ней в явном виде не выделены частоты, характеризующие движение ОЧ вокруг ее центра масс.

Вычисление частот системы (1-5) является трудной задачей по причине их зависимости не только от медленных переменных (параметров движения центра масс), но и от быстрых, в частности, от пространственного угла атаки. Поэтому для определения условий возникновения резонансов, которые сводятся к построению некоторых гладких резонансных кривых (в общем случае поверхностей), необходимо применять некоторую процедуру разделения движения на медленную и быструю составляющие. В настоящее время существуют два основных подхода к разделению движений в данной задаче.

- 1) применение метода усреднения к системе с быстрыми фазами /1/;
- 2) использование метода интегральных многообразий в сочетании с асимптотическим методом для сингулярно возмущенных систем /2/.

Последний подход может быть использован для определения условий возникновения резонансов при задании аэродинамических характеристик ОЧ в виде таблиц, графиков и т.п., что важно в практическом отношении.

Оценка резонансной угловой скорости вращения ОЧ вокруг продольной оси для главного резонанса имеет вид [2]:

$$\omega_x^p = \pm \sqrt{-\frac{M_{Zn} c t g \alpha}{I - I_x}} \quad (6)$$

где M_{Zn} – восстанавливающий аэродинамический момент, определенный в той или иной форме; I, I_x – поперечный и продольный осевые моменты инерции ОЧ.

4. Так как при отделении от ракеты-носителя ОЧ имеет положительный начальный угол наклона траектории $\theta_0 > 0$ и довольно большую начальную скорость (боковые бланеты $V_0 \approx 2000$ м/с, вторые ступени $V_0 \approx 4000$ м/с), то особенностью движения ОЧ является наличие трех характерных участков (рис. 1):

1) восходящий участок движения в плотных слоях атмосферы с уменьшением скорости напора до малых значений; 2) внеатмосферный участок движения по баллистической траектории; 3) участок входа и снижения в плотных слоях атмосферы.

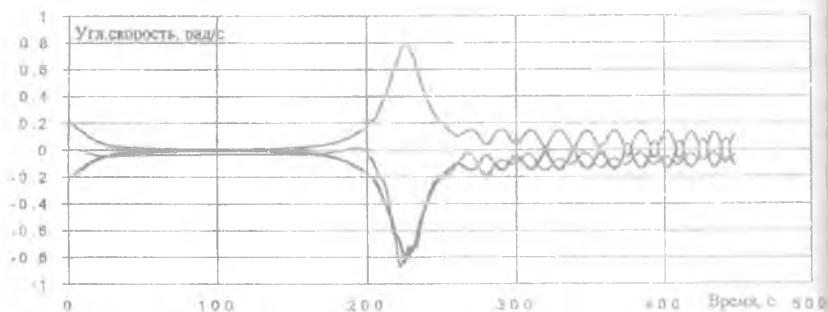


Рисунок 1 - Изменение резонансной и продольной угловой скорости вращения ОЧ по времени полета

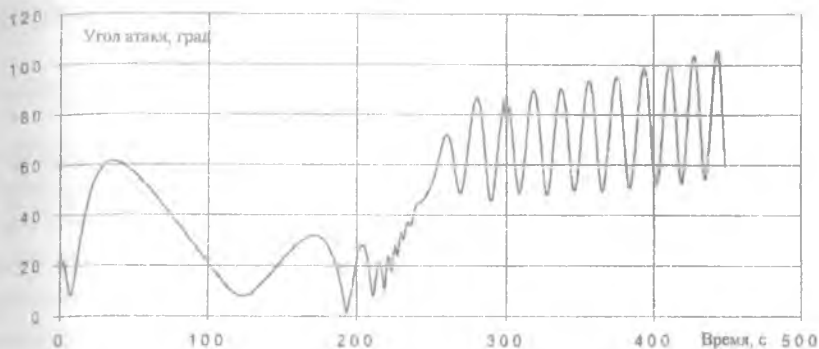


Рисунок 2 - Изменение угла атаки ОЧ по времени полета

После отделения от РН ОЧ сравнительно быстро выходит из плотных слоев атмосферы и, хотя угловая скорость $\omega_x(t)$ и пересекает резонансную кривую, захвата в длительный резонансный режим движения, когда $\omega_x \approx \omega_x^P$, не происходит. Вторым внеатмосферный участок движения важен тем, что на нем формируются начальные условия входа в атмосферу (третий участок движения). Так как на внеатмосферном участке движения главный вектор внешнего момента, действующего на ОЧ, стремится к нулю (аэродинамические и гравитационные моменты пренебрежимо малы), то на этом участке угловые скорости движения ОЧ остаются такими же малыми и ограниченными. Изменение и притом существенное происходит лишь с углом атаки ОЧ, вследствие поворота на баллистической траектории вектора скорости V (изменение угла наклона траектории)

В связи с этим сравнительно малые углы атаки, возникающие при отделении от РН, не сохраняются и вход в плотные слои атмосферы может происходить с углами атаки, достигающими $\alpha_{ax} \approx 180^\circ$.

Дальность полета ОЧ на третьем участке движения (и ее разброс) в существенной степени определяется величиной коэффициента лобового сопротивления C_{xv} , который в свою очередь зависит от углов атаки, возникающих при снижении.

В зависимости от величины и вида несимметрии ОЧ возможны следующие основные характерные случаи движения: 1) пересечение резонансной кривой $\omega_x^P(t)$ без захвата в длительный резонансный режим движения; 2) захват в длительный резонансный режим на всей

траектории снижения; 3) частичный захват в длительный резонансный режим движения или восходящей ветви резонансной кривой $\omega_x^H(t)$, или на ее нисходящей ветви.

Второй случай движения характеризуется тем, что после захвата в резонанс углы атаки ОЧ возрастают до 90° и колеблются относительно этого значения с той или иной амплитудой (рис. 1, 2). Фактически в этом случае продольная ось ОЧ занимает положение поперек набегающего потока и начинает вращаться вокруг вектора скорости. Ясно, что после этого возможны два пути дальнейшей эволюции рассматриваемого движения: 1) разрушение ОЧ на отдельные фрагменты из-за больших поперечных перегрузок и разлет их под действием центробежных сил; 2) дальнейшее движение ОЧ, с максимальным коэффициентом лобового сопротивления C_{xv} , приводящим к траекториям минимальной дальности.

Таким образом, влияние главного резонанса на движение ОЧ может приводить к двум предельным траекториям, соответствующим максимальной (первый случай движения) и минимальной (второй случай движения) дальностям полета и определяющим разброс точек падения ОЧ в продольном направлении. Задача анализа разброса точек падения по боковой дальности требует изучения закона изменения по траектории угла крена подъемной силы ОЧ относительно плоскости полета и исследования закономерностей движения существенно несимметричных фрагментов, возникающих после разрушения ОЧ и выходит за рамки представленной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заболотнов Ю.М. Асимптотический анализ квазилинейных уравнений движения в атмосфере КА с малой асимметрией // Космические исследования. 1993. т.31 Вып.6; 1994 т.32 Вып.4-5.
2. Заболотнов Ю.М. Метод исследования резонансного движения одной нелинейной колебательной системы // Известия РАН. МТТ. 1999. Вып.1. с. 33-45.