

На правах рукописи



Еленев Дмитрий Валерьевич

**АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ
ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ ПРИ СПУСКЕ В АТМОСФЕРЕ**

Специальность 05.07.09 – динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Самара 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре динамики полета и систем управления.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Заболотнов Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Горелов Юрий Николаевич,
проректор по научной работе Государственного
образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Самарский
государственный университет»

доктор технических наук, профессор
Титов Борис Александрович,
заведующий кафедрой организации и управления
перевозками на транспорте СГАУ

Ведущее предприятие: Федеральное государственное унитарное предприятие
государственный научно-производственный ракетно-
космический центр "ЦСКБ - Прогресс" (г. Самара)

Защита состоится «27» сентября 2007 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.04 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3А

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ

Автореферат разослан «23» августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета доцент,
кандидат технических наук



Прохоров А. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных и наиболее ответственных этапов космического полета является спуск с орбиты на поверхность планеты. Традиционно применяемые конструктивно-компоновочные схемы космических аппаратов (КА) не всегда могут обеспечить выполнение ограничений, накладываемых тактико-техническими требованиями на контролируемые характеристики пространственного движения КА в атмосфере. Стремление повысить эффективность решаемых при спуске задач путем введения новых аэродинамических схем КА обуславливает необходимость решения принципиально новых проектно-баллистических задач, связанных с обеспечением устойчивости движения в атмосфере. Одним из перспективных средств обеспечения устойчивого движения КА является использование связанных с ним с помощью специальных тросов аэродинамических стабилизаторов (АС). Систему «КА-трос-АС» будем называть тросовой системой (ТС).

ТС могут быть использованы для аэродинамической стабилизации движения КА на различных участках полета: на низких орбитах движения вокруг Земли или других планет, имеющих атмосферу; в верхних слоях атмосферы (на высотах 100-200 км) для предварительной стабилизации движения перед спуском; в плотных слоях атмосферы для обеспечения устойчивого движения перед приземлением. В настоящее время изучается возможность применения ТС для стабилизации движения аварийных спускаемых средств пилотируемых орбитальных комплексов, а также разгонных блоков ракет-носителей для уменьшения районов их возможного падения. Применение ТС позволяет снизить требования к аэродинамическим характеристикам КА и их отклонениям от номинальных значений, так как выбором параметров троса и АС можно обеспечить практически любой запас статической устойчивости системы.

Поэтому актуальной является задача аэродинамической стабилизации движения КА с помощью ТС.

Объектом исследования является система тел «КА-трос-АС», движущаяся в атмосфере планеты.

Предметом исследования являются методы и модели, используемые для решения задачи аэродинамической стабилизации движения КА с помощью ТС.

Достоверность научных положений, результатов и выводов базируется на обоснованности допущений, положенных в основу математического моделирования, использовании положений механики и математического анализа.

Цель работы. Целью диссертационной работы является построение математической модели пространственного движения системы «КА-трос-АС» в атмосфере, получение и исследование условий устойчивости движения системы и

определение на этой основе значений параметров АС и троса, обеспечивающих заданные характеристики ее движения.

Методика исследования. Достижение цели работы основано на использовании методов механики, математики и численного анализа, а также методов и подходов, развитых В. В. Белецким, Е. М. Левиным, В. А. Ярошевским, К. Б. Алексеевым, Г. Г. Бебениным, Н. С. Аржаниковым и др.

Научная новизна. В ходе решения сформулированной задачи получены следующие научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель пространственного движения ТС в атмосфере, учитывающая динамику вращательного движения КА и АС относительно их центров масс.
2. Алгоритм выбора коэффициента увеличения периодов колебаний, обеспечивающий ускоренный расчет процесса спуска ТС в атмосфере с заданной точностью.
3. Метод определения условий статической устойчивости движения ТС в атмосфере, зависящих от геометрических и массово-инерционных характеристик КА и АС.
4. Результаты параметрического анализа статических условий устойчивости движения ТС в атмосфере.

Практическая значимость и внедрение результатов. Практическое значение работы состоит в том, что основные результаты исследования движения ТС в атмосфере доведены до математических моделей, удобных для инженерных расчетов и позволяющих осуществлять анализ альтернативных проектных решений при спуске КА в атмосфере.

Разработанное программное обеспечение позволяет производить расчет пространственного движения ТС в атмосфере с учетом вращательного движения КА и АС.

Результаты исследования использованы для независимой оценки альтернативных схем спуска с орбиты легкой капсулы при осуществлении эксперимента с тросовой системой, проводимого Европейским космическим агентством совместно с ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс» (г. Самара).

Тема работы подержана грантом РФФИ, в котором автор является исполнителем (проект № 07-01-96606, научный руководитель Заболотнов Ю. М.).

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на российско-европейских летних аэрокосмических школах (г. Самара, 2003, 2004 гг.), всероссийском научном семинаре по управлению движением и навигации летательных аппаратов (г. Самара, 2003 г.), академических чтениях по космонавтике (г. Москва, 2004 г.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в двух реферируемых журналах, рекомендованных ВАК ([5,6] в списке публикаций).

Структура, объем и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Объем диссертации составляет 117 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель исследования, сформулирована научная новизна полученных результатов, приведены сведения об апробации работы и публикациях, изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе сформулирована научно-техническая задача аэродинамической стабилизации движения КА с помощью ТС. Проведен аналитический обзор исследований в данной предметной области.

К настоящему времени накоплен значительный опыт разработки и использования методов расчета параметров движения КА в атмосфере. Значительный вклад в исследовании неуправляемого движения КА внесли Ярошевский В. А., Иланов Н. М., Каменков Е. Ф., Кузмак Г. Е., Шилов А. А., Дмитриевский А. А., Асланов В. С., Заболотнов Ю. М., Тимбай И. В. и др.

Метод аэродинамической стабилизации движения КА по отношению к вектору его скорости с помощью ТС не является новым и описан в монографии Алексеева К.Б., Бебенина Г.Г. «Управление космическим летательным аппаратом» (1975 год). Однако подробного анализа движения таких ТС с учетом особенностей формы и массово-инерционных характеристик КА и АС не проводилось.

Несмотря на значительное число работ по вопросам использования эффективных численных методов решения систем дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение КА в атмосфере, задача выбора коэффициента увеличения периодов колебаний, обеспечивающего ускоренный расчет процесса спуска ТС в атмосфере с заданной точностью, в полном объеме не рассмотрена и поэтому требует дополнительных исследований.

На основании проведенного в работе анализа имеющихся результатов по аэродинамической стабилизации движения КА с помощью ТС сформирована схема исследований, проведенных в диссертационной работе (рисунок 1).

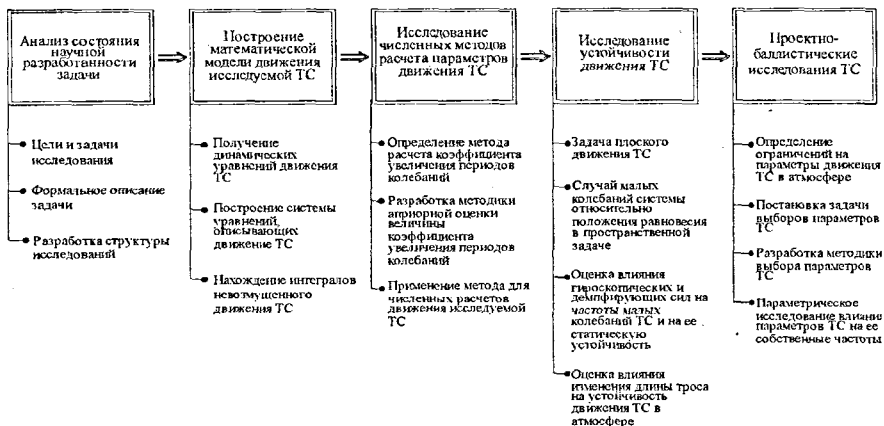


Рисунок 1 – Схема исследований

Вторая глава посвящена построению математической модели пространственного движения связки «КА–трос–АС» в атмосфере. Описаны системы координат (СК), силы, действующие на механическую систему в атмосфере, и допущения, использованные для вывода уравнений движения.

Вывод уравнений движения ТС в атмосфере (рисунок 2) основан на совместном применении теоремы об изменении кинетического момента для каждого тела, теоремы о движении центра масс системы твердых тел и на геометрических уравнениях связей между телами. Диссипация энергии за счет сил трения в точках крепления троса не учитывается. Изменение гравитационного ускорения в пределах размеров ТС полагается пренебрежимо малым, а минимальная длина троса выбирается из условия незначительности аэродинамического влияния КА и АС друг на друга. Рассматриваемая динамическая система имеет двенадцать степеней свободы и описывается системой из двадцати одного обыкновенного дифференциального уравнения, записанной в неявной форме. Уравнения движения центра масс всей системы записаны в упрощенной форме, так как в работе не рассматриваются вопросы расчета координат точек приземления ТС.

Система динамических дифференциальных уравнений, описывающих вращательные движения системы, в матричной форме имеет вид

$$A \cdot \ddot{\omega} = B, \quad (1)$$

где A - квадратная матрица переменных коэффициентов, зависящих от углового положения и угловых скоростей каждого тела, $\ddot{\omega} = [\dot{\omega}_{x1}, \dot{\omega}_{y1}, \dot{\omega}_{z1}, \dot{\omega}_{x2}, \dot{\omega}_{y2}, \dot{\omega}_{z2}, \dot{\omega}_{x3}, \dot{\omega}_{y3}, \dot{\omega}_{z3}]^T$ - вектор компонентов угловых ускорений, B - вектор правых частей динамических дифференциальных уравнений.

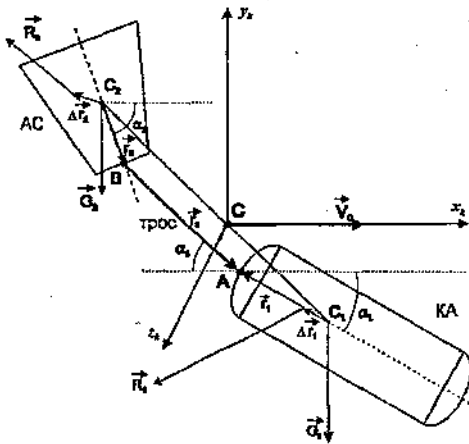


Рисунок 2 - Рассматриваемая тросовая система

Для невозмущенного случая движения ТС, когда КА и АС представляют собой осесимметричные тела, а скоростной напор постоянен, получено несколько интегралов движения системы: 1) интеграл, аналогичный интегралу энергии; 2) интеграл, описывающий закон сохранения проекции вектора кинетического момента системы на направление вектора скорости центра масс системы; 3) интегралы, описывающие законы сохранения проекций векторов кинетических моментов каждого тела на их оси симметрии. Первые два интеграла справедливы только для сферических тел. Остальные интегралы справедливы для произвольных осесимметричных тел даже в случае медленного изменения скоростного напора. Полученные интегралы движения были использованы для тестирования разработанной программы численного интегрирования уравнений пространственного движения ТС.

Третья глава посвящена сокращению трудоемкости интегрирования системы дифференциальных уравнений с помощью метода увеличения периодов колебаний. Рассматриваемый метод предложен Ярошевским В. С. и Восейковым В. В. и в дальнейшем был развит для случая многомерных вращательно-колебательных движений Заболотновым Ю. М. Сущность метода заключается в построении преобразованной системы, быстрые переменные которой изменяются с меньшей частотой, что позволяет существенно ускорить процесс расчета. Вид преобразованной системы выбирается исходя из инвариантности уравнений первого приближения метода усреднения для обеих систем, что ведет, например, к совпадению амплитуд колебаний быстрых переменных. Метод особенно эффективен для систем, характеризуемых высокими исходными частотами.

Полученные динамические уравнения (1) дополняются кинематическими уравнениями Эйлера для двух тел и троса и уравнениями движения центра масс, которые записываются в традиционной форме.

При численном интегрировании дифференциальных уравнений движения системы, имеющих неявную форму, использован классический метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности с переменным шагом.

Пусть система общего вида, описывающая многомерные вращательно-колебательные движения, описывается уравнениями вида

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon X_1(x, y) + \varepsilon^2 \dots, \quad \frac{dy}{dt} = Y_0(x, y) + \varepsilon Y_1(x, y) + \varepsilon^2 \dots, \quad (2)$$

где ε - малый параметр, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ - вектор медленных переменных системы, $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ - вектор быстрых переменных системы, $X_i(x, y)$ - n -мерные вектор-функции ($i = \overline{1, n}$), $Y_i(x, y)$ - m -мерные вектор-функции ($i = \overline{0, m-1}$). Функции X_i и Y_i удовлетворяют условиям теоремы о первом приближении метода усреднения.

При применении метода увеличения колебаний исходная система (2) преобразуется к системе вида

$$\frac{dx_*}{dt} = \varepsilon X_1(x_*, y_*) + \varepsilon^2 \dots, \quad \frac{dy_*}{dt} = K(x_*) Y_0(x_*, y_*) + \varepsilon Y_1(x_*, y_*) + \varepsilon^2 \dots, \quad (3)$$

где $0 < K(x_*) < 1$ - некоторый коэффициент увеличения периодов, знак * - обозначает переменные преобразованной системы.

Вид преобразованной системы уравнений движения ТС должен соответствовать виду общей преобразованной системы (3). Поэтому необходимо, во-первых, разделить все интегрируемые переменные на медленные и быстрые и, во-вторых, в правых частях дифференциальных уравнений выделить функции, характеризующие действие возмущений $X_1(x_*, y_*)$, $Y_1(x_*, y_*)$.

Разделение переменных и выделение возмущающих функций проводится из имеющегося опыта использования метода увеличения периодов колебаний для расчета движения в атмосфере одного почти симметричного тела. В этом случае вектора медленных и быстрых переменных имеют следующий вид:

$$x = [u, \omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{x3}]^T, \quad y = [\omega_{y1}, \omega_{z1}, \omega_{y2}, \omega_{z2}, \omega_{y3}, \omega_{z3}, \alpha, \phi, \gamma]^T,$$

где u - вектор параметров движения центра масс системы, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T$, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3]^T$, $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3]^T$ - углы атаки, собственного вращения, крена КА, АС и троса, соответственно. В дальнейшем индекс «1» относится к КА, индекс «2» - к АС и индекс «3» - к тросу.

В уравнениях для быстрых переменных в возмущающих функциях $Y_1(x, y)$ учитываются демпфирующие моменты относительно поперечных осей каждого тела и другие малые возмущения, возникающие от асимметрии (геометрической и массовой) почти симметричных тел. В кинематических уравнениях для углов α, ϕ, γ к малым возмущениям следует отнести слагаемые, возникающие от неинерциальности подвижных связанных СК.

Коэффициент увеличения периодов колебаний $K(x)$, где x - вектор медленных переменных в преобразованной системе, задается в виде $K(q) = K_n K_q$, где $K_n = const$ - постоянный по траектории коэффициент, определяемый инерционно-массовыми и аэродинамическими параметрами тел; K_q - коэффициент, учитывающий изменение частот колебаний системы по траектории; q - скоростной напор.

Так как все частоты колебаний тел при их движении в атмосфере пропорциональны величине \sqrt{q} , то коэффициент K_q определяется как отношение $K_q = \sqrt{\frac{q(H_n)}{q(H)}}$, где $q(H_n)$ - скоростной напор на высоте начала применения метода увеличения периодов, $q(H)$ - скоростной напор на текущей высоте.

Предложен метод выбора коэффициента K_n , позволяющий заранее оценивать величину коэффициента по заданным параметрам связки и длины троса по следующему алгоритму: 1) задается «эталонная» ТС с некоторыми известными параметрами; 2) для «эталонной» ТС, исходя из заданной погрешности вычислений, на основании численных экспериментов проводится выбор коэффициента увеличения периодов колебаний K_n ; 3) аналитически оцениваются собственные частоты «эталонной» ТС; 4) для рассматриваемой ТС также оцениваются величины собственных частот; 5) на основании сравнения частот «эталонной» ТС и рассчитываемой ТС задается новый коэффициент увеличения периодов колебаний K_n .

Результаты численных расчетов показали, что требуемый коэффициент увеличения периодов колебаний можно оценить по формуле:

$$K_n = K_n^0 \frac{\max_i \omega_{ci}^2}{\max_i \omega_{ci}}, \quad (4)$$

где $\max_i \omega_{ci}^2$, $\max_i \omega_{ci}$ - соответственно оценки максимальных частот «эталонной» ТС и рассматриваемой ТС, K_n^0 - коэффициент увеличения периодов, соответствующий «эталонной» ТС.

Показано, что применение метода для данной задачи позволяет получить значительно больший выигрыш (в несколько десятков раз) в объеме вычислений по сравнению с выигрышем при интегрировании уравнений движения одного твердого тела в атмосфере. В качестве примера на рисунке 3 приведены зависимости углов атаки троса $\alpha_3(t)$ и $\alpha_2(t)$, вычисленные в соответствии с исходной и преобразованной системами. Они показывают, что амплитуды колебаний углов атаки практически совпадают, хотя период колебаний преобразованной системы существенно больше.

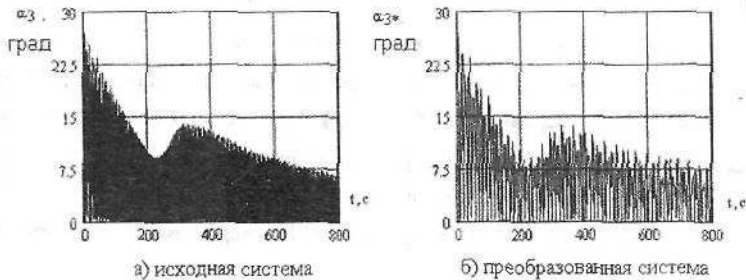


Рисунок 3 – Зависимости углов атаки от времени

В четвертой главе анализируются вопросы устойчивости движения ТС в атмосфере.

Рассмотрено плоское движение связки «КА–трос–АС». Необходимая математическая модель получается как частный случай полученной ранее пространственной модели. Рассмотрение плоской задачи связано с записью условий статической устойчивости (необходимых условий устойчивости) движения системы в атмосфере, а именно, статической устойчивости частного решения $\alpha_i = 0$ ($i = \overline{1,3}$).

Интеграл, аналогичный интегралу энергии, позволил получить простое условие статической устойчивости движения ТС для сферических тел:

$$m_1 R_2 - m_2 R_1 < 0, \quad (5)$$

где m_1, m_2 - соответственно массы, а R_1, R_2 - модули векторов аэродинамических сил, действующих на КА и АС.

Для получения более общих условий статической устойчивости движения ТС, состоящей из осесимметричных тел, рассматривается случай малых колебаний относительно положения равновесия $\alpha_i = 0$, $i = \overline{1,3}$. Анализ статической устойчивости в этом случае сводится к анализу значений корней полинома третьей степени относительно λ^2 :

$$p_\lambda \lambda^6 + q_\lambda \lambda^4 + r_\lambda \lambda^2 + t_\lambda = 0, \quad (6)$$

где $p_\lambda = m_{12} I_1 I_2 r_3$, $m_{12} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$, $q_\lambda = -\{m_{12} I_1 r_2 (r_2 + r_3) + m_{12} I_2 r_1 (r_1 + r_3) + I_1 I_2 \Delta R_x\}$,

$$r_\lambda = I_1 \Delta R_x r_2 \left(\Delta R_x - \frac{m_1}{m_1 + m_2} R_{2yk}^\alpha \right) + I_2 \Delta R_x r_1 \left(\Delta R_x + \frac{m_2}{m_1 + m_2} R_{1yk}^\alpha \right) + m_{12} \Delta R_x^2 r_1 (r_1 r_2 + r_2^2 + r_2 r_3),$$

$$t_\lambda = -r_1 r_2 (\Delta R_x)^2 \cdot (\Delta R_x - \Delta R_y^\alpha), \quad \Delta R_x = \frac{m_1 R_{2yk}^\alpha - m_2 R_{1yk}^\alpha}{m_1 + m_2}, \quad \Delta R_y^\alpha = \frac{m_1 R_{2jk}^\alpha - m_2 R_{1jk}^\alpha}{m_1 + m_2},$$

$R_{yi}^{\alpha} = (C_{xi} + C_{yi}^{\alpha})qS_i$, I_1, I_2 - поперечные осевые моменты инерции КА и АС, $R_{1,ik}, R_{1,yk}, R_{2,ik}, R_{2,yk}$ - проекции аэродинамических сил на оси траекторной системы координат, начало которой совпадает с центром масс ТС; C_{xi} и C_{yi}^{α} - аэродинамические коэффициенты ($C_{xi} < 0, C_{yi}^{\alpha} > 0$), q - скоростной напор, S_i - характерные площади КА и АС, $i = 1, 2$.

Решение $\alpha_i = 0, i = \overline{1,3}$ будет статически устойчиво, если все корни характеристического уравнения (5) чисто мнимые. Если система статически устойчива, то характеристическое уравнение позволяет определить частоты малых колебаний рассматриваемой ТС в плоском случае.

Область статической устойчивости может быть записана в параметрах Вышнеградского:

$$f(A, B) < 0,$$

где $f(A, B) = \left(\frac{B}{3} - \frac{A^2}{9}\right)^3 + \left(\frac{A \cdot B - 3}{6} - \frac{A^3}{27}\right)^2$, $A = \frac{q\lambda}{\sqrt{I_x p_x^2}}$ и $B = \frac{r_{\lambda}}{\sqrt{I_y^2 p_x^2}}$ - параметры Вышне-

градского. На рисунке 4 показано типичное поведение функции $f(A, B)$. При переходе функции через 0 (с минуса на плюс) система теряет устойчивость.

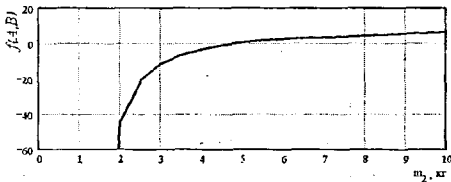


Рисунок 4 - Поведение функции $f(A, B)$.

Анализируя в общем случае решения алгебраического уравнения (6) и вид его коэффициентов для осесимметричных тел, можно сделать следующие выводы: 1) необходимое условие статической устойчивости движения ТС для сферических тел (5) сохраняется и для тел вращения в

виде $\Delta R_x < 0$, так как при $\Delta R_x = 0$ все корни уравнения (6) нулевые и при переходе параметра ΔR_x через ноль система теряет устойчивость; 2) потеря статической устойчивости в системе возможна также при переходе через ноль значения параметра $\Delta R_x - \Delta R_y^{\alpha}$, что приводит к обнулению двух корней уравнения (6). Поэтому условие

$$\Delta R_x - \Delta R_y^{\alpha} < 0 \quad (7)$$

также является необходимым условием статической устойчивости рассматриваемой ТС для случая осесимметричных тел. Если тела в ТС сферические, то условия статической устойчивости (5) и (7) тождественно совпадают.

Проведена оценка влияния гироскопических и демпфирующих сил на частоты малых колебаний системы и на ее статическую устойчивость. Рассмотрена пространственная модель движения ТС, когда угловые скорости вращения КА и АС

вокруг их осей симметрии отличны от нуля. При малых углах атаки модель записывается в комплексной форме

$$F \frac{d^2 \xi}{dt^2} + (\Gamma + D) \frac{d\xi}{dt} + C\xi = 0, \quad (8)$$

где квадратные матрицы Γ и D размерностью 3×3 характеризуют соответственно гироскопические и демпфирующие силы; матрицы F и C соответствуют плоскому случаю движения ТС; $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]^T$ - вектор комплексных углов атаки, $\xi_i = j\alpha_i e^{j\theta_i}$; γ_i - углы крена тел и троса по отношению к плоскости полета центра масс ТС; j - мнимая единица, $i=1,2,3$.

Рассматривается случай диагональной матрицы D , а матрица гироскопических слагаемых имеет вид

$$\Gamma = \begin{pmatrix} -j\omega_{x1}(I_{x1} + m_{12}r_1^2) & -j\omega_{x2}m_{12}r_1r_2 & -j\omega_{x3}m_{12}r_1r_3 \\ -j\omega_{x1}m_{12}r_1r_2 & -j\omega_{x2}(I_{x2} + m_{12}r_2^2) & -j\omega_{x3}m_{12}r_2r_3 \\ -j\omega_{x1}m_{12}r_1r_3 & -j\omega_{x2}m_{12}r_2r_3 & -j\omega_{x3}(I_{x3} + m_{12}r_3^2) \end{pmatrix},$$

где $\omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{x3}$ - угловые скорости тел при их вращении вокруг своих осей симметрии, I_{x1}, I_{x2} - моменты инерции КА и АС относительно тех же осей.

Системе дифференциальных уравнений (8) соответствует характеристическое алгебраическое уравнение:

$$\det[FA^2 + (\Gamma + D)\lambda + C] = 0. \quad (9)$$

При $\Gamma = D = 0$ характеристические уравнения (6) и (9) совпадают.

Анализ корней уравнения (9) показывает, что наличие гироскопических и демпфирующих членов в уравнениях не может нарушить условия статической устойчивости движения ТС, полученных для плоского случая. Это соответствует известным общим теоремам теории устойчивости движения механических систем. Характеристическое уравнение (9) позволяет оценить изменение частот системы при действии на нее гироскопических и демпфирующих сил.

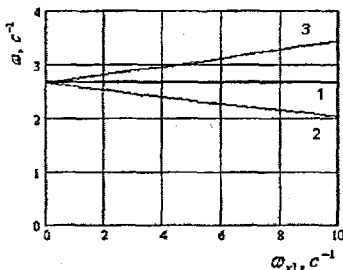


Рисунок 5 – Пример расщепления частот

Проведено исследование влияния угловых скоростей вращения тел на собственные частоты ТС. На рисунке 5 в качестве примера приведена зависимость наиболее низкой частоты системы от угловой скорости вращения КА ω_{x1} . Влияние угловой скорости ω_{x1} заключается в следующем: частота, определенная при $\omega_{x1} = 0$ (линия 1 на

рисунке 5), разделяется на две частоты (линии 2 и 3), которые расположены по обе стороны от исходной, то есть происходит расщепление частот на две. Влияние угловых скоростей ω_{x2}, ω_{x3} на частоты системы аналогично. Основное влияние на изменение частот при увеличении угловых скоростей $\omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{x3}$ оказывают отношения величин моментов инерции входящих в ТС тел: чем меньше отношения моментов инерции I_{x1}/I_1 и I_{x2}/I_2 , тем расщепление частот происходит на меньшие величины. Наибольшее по величине расщепление частот наблюдается для сферических тел. Если тела, входящие в систему, специально не закручены вокруг своих продольных осей, отличие частот системы в пространственном случае движения от частот плоского случая незначительно.

Оценено влияние дополнительного стабилизирующего фактора, связанного с изменением длины троса $r_3(t)$ во время движения ТС, на ее устойчивость.

Вычислены дополнительные слагаемые в уравнениях движения ТС, зависящие от скорости и ускорения изменения длины троса. Проведенный анализ относится к вопросам динамической устойчивости движения ТС, так как при этом рассматривается медленное изменение амплитуд колебаний углов атаки $\alpha_i, i = \overline{1,3}$ в процессе спуска ТС в атмосфере. Установлено, что если скорость изменения длины троса имеет тот же порядок, что и скорость изменения скоростного напора (медленное изменение этих параметров по сравнению с быстрыми колебаниями по углам атаки в ТС), то влияние изменения длины троса на амплитуды колебаний углов атаки незначительно. Тем не менее, выбором закона изменения длины троса $r_3(t)$ можно добиться несколько лучшей (несколько градусов по амплитудам колебаний) стабилизации движения ТС. С другой стороны, если условие медленности изменения длины троса не выполняется, то, как показали расчеты, при определенной предельной скорости развертывания ТС может потеряться устойчивость движения.

В пятой главе рассмотрены вопросы выбора параметров АС и длины троса при заданных проектных параметрах КА с целью минимизации массы АС. Проектными параметрами являются масса и геометрические характеристики АС и длина троса. Принято допустить, что размеры АС можно изменять в определенных пределах, изменяя его формы. При решении задачи учитываются следующие ограничения: на значения углов атаки каждого из тел, входящих в ТС; на угловые скорости вращательного движения; на величину силы натяжения троса и ограничения, накладываемые на параметры движения центра масс ТС.

Выполнение ограничений на значения углов атаки связано с вопросами устойчивости движения ТС, рассмотренными в четвертой главе. Выполнение условий

устойчивости решения $\alpha_i = 0$, $i = \overline{1,3}$ является необходимым условием выполнения ограничений по угловому движению ТС.

Ограничения на угловые скорости вращательного движения и на величину силы натяжения троса обеспечиваются при выполнении условий устойчивости ТС по углам атаки. Увеличение угловых скоростей в ТС приводит к возрастанию силы натяжения троса, которая может привести к его разрыву. Значения угловых скоростей зависят от значений собственных частот ТС.

Задача выбора параметров ТС формулируется следующим образом: необходимо выбрать геометрические и массово-инерционные параметры АС и длину троса, исходя из минимума массы АС с учетом ограничений на параметры вращательного движения (углы атаки, угловые скорости вращения и силу натяжения троса).

Проведено исследование влияния параметров ТС на ее собственные частоты, которые определялись в соответствии с оценками, полученными во второй главе. Получены следующие основные результаты: 1) при уменьшении массы и при увеличении размеров АС собственные частоты увеличиваются; 2) при увеличении длины троса собственные частоты уменьшаются и асимптотически приближаются к некоторому предельному значению; 3) при заданных параметрах КА всегда существует некоторая предельная масса АС (при ее увеличении), при которой происходит потеря устойчивости.

На рисунке 6 в качестве примера показаны зависимости собственных частот системы от массы АС для системы «конус – конус» в случае легкого КА (масса 10 кг), которые демонстрируют потерю устойчивости движения ТС при увеличении массы АС (устойчивой системе на рисунке 6 соответствует существование трех положительных частот).

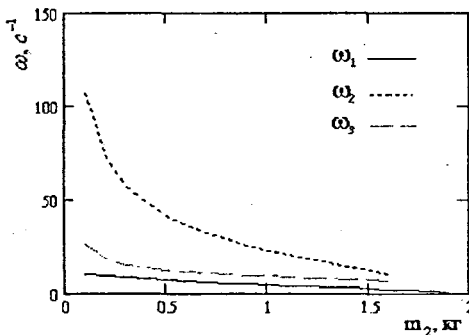


Рисунок 6 - Пример зависимость частот системы от массы АС

Поскольку натяжение троса определяется при численном интегрировании полной системы уравнений движения в атмосфере, то был проведен анализ влияния различных параметров ТС на величину силы натяжения. Установлено, что сила натяжения в первую очередь зависит от характерной площади АС, при этом влияние длины троса незначительно.

Для выбора параметров ТС разработана методика, основанная на задании требуемых собственных частот и совместном решении трех нелинейных уравнений, составленных из условия, что характеристическое уравнение (6) имеет заданные корни.

Проведен анализ устойчивости движения ТС и силы натяжения троса для различных конфигураций КА и АС: «цилиндр – полусфера» (примером может служить связка «отсек разгонного блока - отделяемое днище бака», рассмотренная в ИТО № 851-4711-2220/99-215 ЦНИИМАШ), «цилиндр – цилиндр» (разгонный блок, разделенный на две части - бак горючего и бак окислителя), «конус – конус» (легкая спускаемая капсула с АС). Показано, что каждая конфигурация ТС требует своих подходов при выборе ее параметров. Установлено, что при больших массах ТС основным ограничением, которое необходимо учитывать, является сила натяжения троса. На рисунке 7 показана зависимость

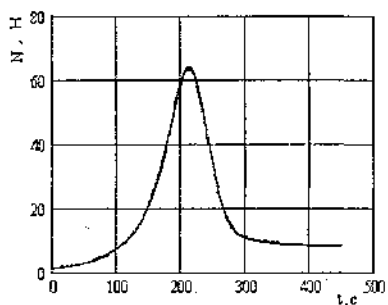


Рисунок 7 – Сила натяжения троса для связки «конус-конус»

силы натяжения троса N (в Π) от времени для легкого КА (массой 10 кг) в форме конуса с коническим АС. Показано, что при использовании конфигурации «конус – конус» можно выбрать такие параметры АС, что компенсируется динамическая неустойчивость КА, выполненного в виде конуса с углом при его вершине 90° и более. Это позволяет проектировать ТС с большой площадью мишеля АС и использовать их при спуске без применения парашютных систем.

Основные научные и практические результаты выполненной работы состоят в следующем.

1. Построена математическая модель пространственного движения ТС, учитывающая динамику вращательного движения КА и АС и представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений в неявной форме. Применение метода увеличения периодов колебаний позволяет в 10 и более раз уменьшить вычислительные затраты при расчете движения ТС по полученным дифференциальным уравнениям.

2. Анализ статической устойчивости движения ТС сводится к анализу корней кубического характеристического уравнения, значения которых зависят от геометрических и массово-инерционных характеристик КА, АС. При заданных параметрах КА статическая устойчивость ТС определяется только характеристиками АС и не зависит от длины троса. Влияние гироскопических сил приводит к явлению расщепления частот и не приводит к потере устойчивости движения ТС. Увеличение длины троса в процессе спуска приводит к уменьшению амплитуд колебаний в системе.

3. Влияние изменения длины троса на амплитуды колебаний углов атаки незначительно, если скорость изменения длины троса имеет тот же порядок, что и скорость изменения скоростного напора.

4. Предложенная методика выбора параметров ТС, основанная на использовании полученных условий статической устойчивости движения, позволяет уменьшить величину ее собственных частот в два и более раза.

5. При проектировании ТС основным ограничением является сила натяжения троса, величина которой увеличивается при увеличении массы всей системы.

6. При движении в атмосфере легкой капсулы массой 10 кг в форме конуса с углом при его вершине более 90° применение конического АС позволяет обеспечить динамическую устойчивость движения ТС на всей траектории ее спуска в атмосфере.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Еленев Д.В. Математическое моделирование движения связки двух твердых тел в атмосфере // Аспирантский вестник Поволжья, №2/2002, с. 22-23.
2. Заболотнов Ю.М., Еленев Д.В. Движение связки двух твердых тел на тросе в атмосфере // Управление движением и навигация летательных аппаратов: Сб. Тр. XI Всерос. научно-техн. семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов / Самарс. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 2003, с. 78-82.
3. Yelenev D.V. Motion of two connected by tether bodies in the atmosphere // Proceedings of the Russian-European Summer Space School 'Future Space Technologies and Experiments in Space'. 30 June – 11 July, Samara State Aerospace University, Samara, Russia, WPP229, p. 171 – 172, 2003.
4. Заболотнов Ю.М., Еленев Д.В. Моделирование и анализ движения в атмосфере связки двух тел, соединенных тросом // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Труды XXVIII академических чтений по космонавтике. М., 2004, с. 115-116.
5. Заболотнов Ю.М., Еленев Д.В. Выбор параметров тросовой системы «Спускаемый аппарат – аэродинамический стабилизатор» // Наука - производству, 2006 № 6(93), с. 49-52.
6. Заболотнов Ю.М., Еленев Д.В. Движение в атмосфере тросовой системы спускаемый аппарат - аэродинамический стабилизатор // Известия СИЦ РАН, т.8, № 3, 2006, с.833-840.

Подписано в печать 10.08.2007. Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов СГАУ