



В.В. Любимов, И. Бакри

УПРАВЛЕНИЕ ГАБАРИТАМИ СПУСКАЕМОГО В АТМОСФЕРЕ МАРСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С КОРПУСОМ В ФОРМЕ ДВУПОЛОСТНОГО ГИПЕРБОЛОИДА

(Самарский университет)

Аннотация. В данной работе рассматривается пассивное управление угловой скоростью спускаемого космического аппарата с целью обеспечения его стабильной ориентации на этапе движения в разреженной атмосфере. Управление угловой скоростью КА производится посредством изменения габаритов верхней части корпуса КА, имеющего форму двуполостного гиперboloида вращения. Для описания движения КА относительно центра масс применяется главная связанная система координат XYZ , где ось Z является продольной осью симметрии конструкции КА.

Постановка задачи нелинейного программирования

Для управления угловой скоростью ω_z КА требуется: либо управлять величиной момента M_z , либо изменять момент инерции изменяемой части корпуса $I_{z1}(a, c, h, t)$, либо производить совместное изменение обеих этих величин. В работе [1] производилось управление величиной момента M_z посредством использования бортовых двигателей. В данном исследовании предполагается осуществлять управление угловой скоростью ω_z посредством изменения величины момента инерции $I_{z1}(a, c, h, t)$, при изменении габаритов КА.

Величину угловой скорости $\omega_z(t)$ определяем из закона сохранения кинетического момента:

$$\omega_z(t) = (I_{z1}(a, c, h, 0) + I_{z2})\omega_z(0) / (I_{z1}(a, c, h, t) + I_{z2}) \quad (1)$$

Здесь $\omega_z(0)$ – известное начальное значение угловой скорости $\omega_z(t)$, $I_{z1}(a, c, h, 0)$ – известное начальное значение момента инерции $I_{z1}(a, c, h, t)$, I_{z2} – постоянный известный суммарный момент инерции посадочного аппарата и теплозащитного щита относительно оси Z .

С целью определения искомых величин V и S , а также для нахождения величины $I_{z1}(a, c, h, t)$ для КА, имеющего верхнюю часть конструкции в форме двуполостного гиперboloида с изменяемыми габаритами, сформулируем задачу нелинейного программирования (НЛП) следующим образом: найти вектор параметров $x^T = (a, c)$, таким образом, чтобы минимизировать скалярную целевую функцию $I_{z1}(a, c, h, t)$ для каждого значения высоты КА h , учитывая заданные ограничения на величину объёма V и площади поперечного сечения S половины поверхности двуполостного гиперboloида вращения:

$$\begin{aligned} \min_{a, c} I_{z1}(a, c, h), \\ V \geq V_{\min}, \\ 0 < S \leq S_{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$



Здесь: V, V_{\min} – объем половины гиперболоида и минимальная величина половины внешнего объема гиперболоида последовательно, S, S_{\max} – площадь поперечного сечения гиперболоида в наибольшем нижнем сечении и заданная наибольшая площадь поперечного сечения гиперболоида, $S_{\max} = \pi R_{\max}^2$, R_{\max} – радиус поверхности с теплозащитным покрытием. Метод нелинейного программирования описан, например, в работе [2].

Запишем левые части неравенств у задачи НЛП (2) в виде соответствующих формул для однородного двуполостного гиперболоида вращения, имеющего объем V , площадь поперечного сечения S и момент инерции I_{z1} . В результате получим:

$$\min_{a,c} \frac{\rho a^4 \pi}{2 c^4} \left(\frac{h^5 - c^5}{5} - \frac{2}{3} c^2 (h^3 - c^3) + c^4 (h - c) \right) \geq V_{\min}$$

$$\frac{\pi}{3} (c - h)^2 (2c + h) \left(\frac{a}{c} \right)^2 \geq V_{\min} \quad (3)$$

$$0 < \pi \left(\frac{a}{c} \right)^2 (h^2 + c^2) \leq S_{\max}$$

Численные результаты

Задача нелинейного программирования (3) решается с помощью программного приложения МАТЛАБ. Решение системы (3) производим на интервал высоты КА h от 1.89 м до 2.46 м. Пределы изменения неизвестных величин a и c установлены на отрезке от 0.01 м до 2 м.

На рис. 1 показаны численные результаты в виде зависимостей осевого момента инерции I_{z1} двуполостного гиперболоида от его высоты h . На этой рисунке заметим, что момент инерции I_{z1} имеет высокое значение, которое принимается от 2218 кгм² до 2168 кгм² на интервале изменения высоты от 1.98 м до 2.46 м.

Из рис. 1 следует, что при увеличении высоты космического аппарата, момент инерции I_{z1} уменьшается, как и моменты инерции $I_{x1} = I_{y1}$ также уменьшаются. Согласно описанной выше закономерности (1) для угловой скорости $\omega_z(t)$ получаем, что при входе в разряженную атмосферу после увеличения высоты h КА приобретёт дополнительную угловую скорость относительно оси Z . При этом КА также приобретёт дополнительную угловую скорость относительно оси X или Y . На рис. 2 показаны значения переменных гиперболоида a и c , определяющие минимальное значение осевого момента инерции I_{z1} и значения моментов инерции $I_{x1} = I_{y1}$. Значение переменной гиперболоида a и c на рис. 2 не имеют неизменной тенденции к увеличению или уменьшению при увеличении высоты h от 1.98 м до 2.46 м.

На рис. 3 показаны: зависимость объёма и зависимость площади поперечного сечения двуполостного гиперболоида от его высоты h . Следует отметить, что объём гиперболоида уменьшается при увеличении высоты h . Указанный объём уменьшается от 3.55 м³ до величины $V_{\min} = 1.82$ м³ на выбранных



величинах высот КА. При увеличении высоты h площадь поперечного сечения уменьшается от 4.3 м^2 до 2.25 м^2 . Отметим, что изменение формы поперечного сечения гиперboloида, расположенного за не изменяющим форму теплозащитным щитом, может несколько изменять силу лобового сопротивления.

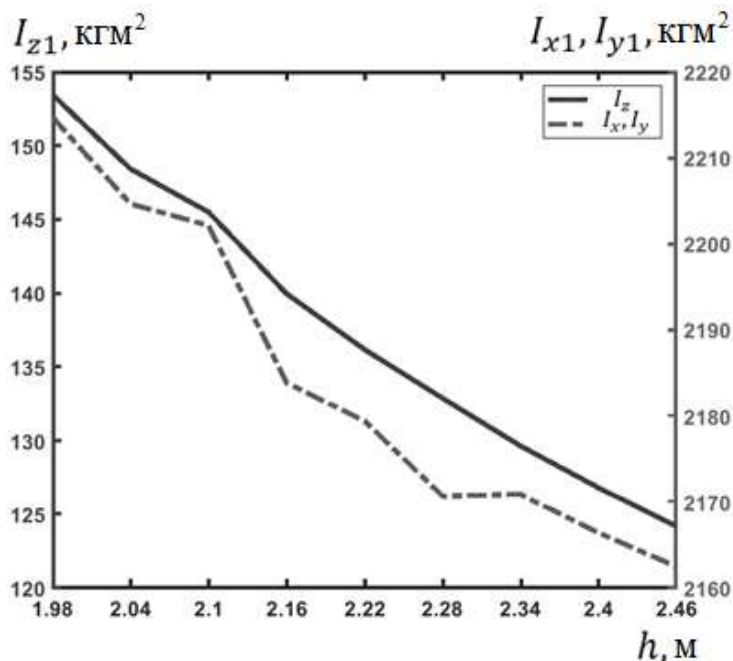


Рис. 1. Зависимости минимального значения момента инерции I_{z1} и моментов инерции $I_{x1} = I_{y1}$ двуполостного гиперboloида от его высоты

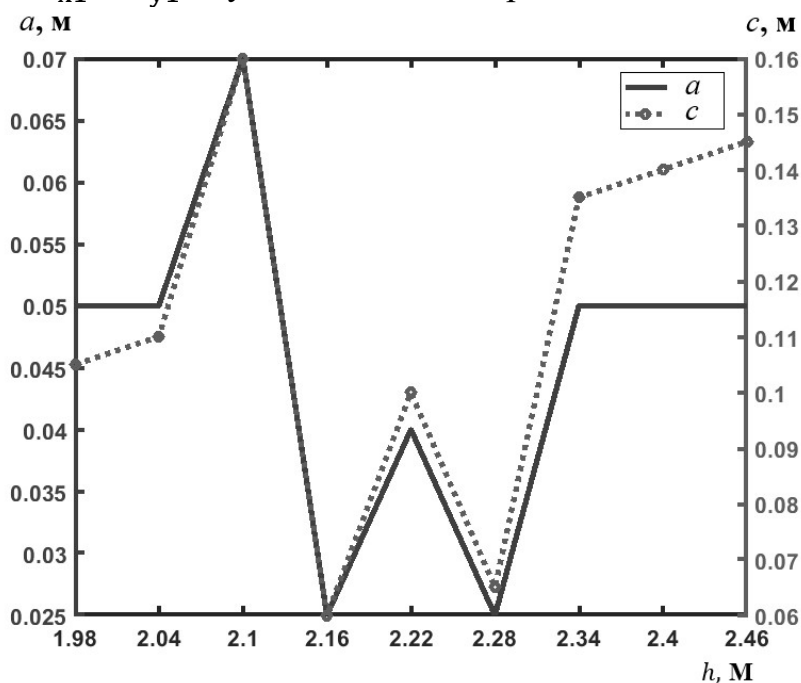


Рис. 2. Зависимость переменных гиперboloида a и c от высоты

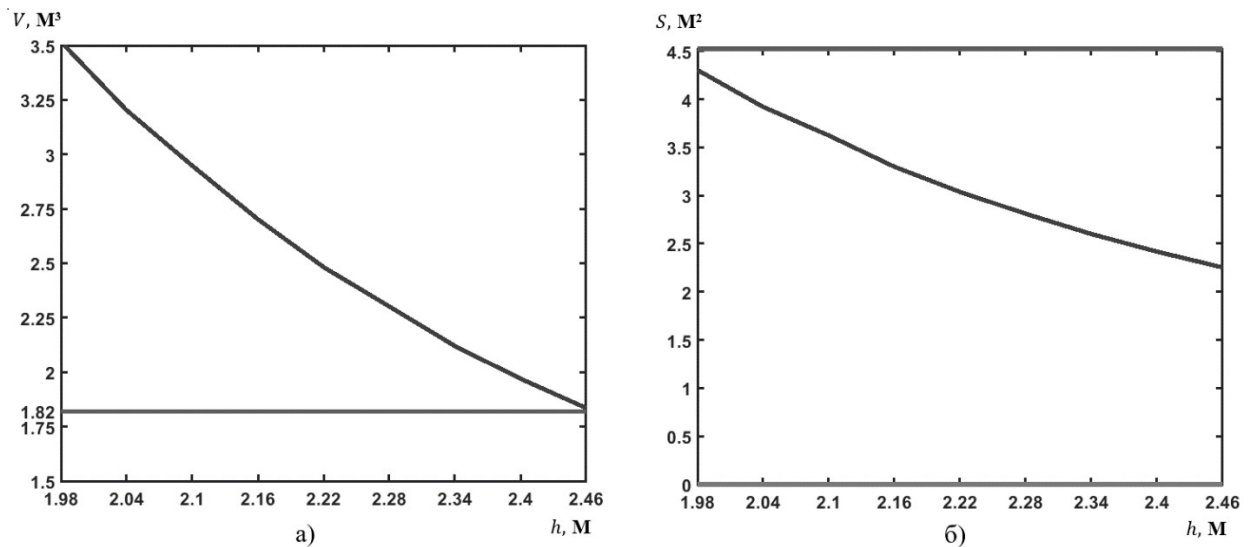


Рис. 3. Зависимость объёма (а) и зависимость площади поперечного сечения (б) двуполостного гиперboloида от высоты h

Анализ численных результатов показал, что при решении поставленной задачи по обеспечению эффективного пассивного управления угловой скоростью КА не следует применять форму аппарата в виде двуполостного гиперboloида вращения. Действительно, при входе в разряженную атмосферу после увеличения высоты h КА приобретёт дополнительную угловую скорость относительно оси Z . При этом КА приобретёт также дополнительную угловую скорость относительно двух других осей X и Y . По этой причине, использование КА в форме двуполостного гиперboloида вращения изменяемой формы нельзя считать перспективным для решения поставленной задачи пассивного управления угловой скоростью КА.

Литература

1. Тырнов П.А. Решение задачи управления перемещением центра масс и угловым движением космического аппарата с использованием двигателей ориентации методом наименьших квадратов // ПАО РКК «Энергия» имени С.П. Королёва, XLIV Королевские академические чтения по космонавтике. Т.17. 2020. С. 177 – 179.
2. David G.L., Yinyn Y. Linear and Nonlinear Programming. Stanford University. Springer, 2008. 546 p.