

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ УГЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ КАПСУЛЫ ПРИ РАЗВЁРТЫВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

В работе проводится статистический анализ вращательного движения капсулы на упругом тросе на основе численного моделирования движения для различных внешних возмущений и с учётом ошибок работы системы управления. При статистическом моделировании используется метод Монте-Карло. Полученные результаты обрабатываются методами статистической линеаризации и наименьших квадратов, которые используются для оценки вклада каждого возмущения в полную дисперсию основных параметров вращательного движения капсулы (модуля угловой скорости спускаемой капсулы и угла нутации оси динамической симметрии относительно направления троса). Закон управления при развёртывании тросовой системы соответствует тросовому эксперименту YES2 [1, 2]. Трос в данной работе является упругой связью, работающей только на растяжение. Орбита базового космического аппарата является круговой. При описании вращательного движения капсулы учитываются гравитационный и аэродинамический моменты и момент от силы упругости троса.

Для описания вращательного движения используются кинематические и динамические уравнения Эйлера [3], которые имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 I_x \cdot \frac{d\omega_x}{dt} + \omega_y \cdot \omega_z \cdot (I_z - I_y) &= M_x, \\
 I_y \cdot \frac{d\omega_y}{dt} + \omega_x \cdot \omega_z \cdot (I_x - I_z) &= M_y, \\
 I_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x \cdot \omega_y \cdot (I_y - I_x) &= M_z, \\
 \frac{d\psi}{dt} &= \frac{\omega_x \cdot \sin \varphi + \omega_y \cdot \cos \varphi}{\sin \theta}, \\
 \frac{d\varphi}{dt} &= \omega_z - \frac{(\omega_x \cdot \sin \varphi + \omega_y \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta}{\sin \theta}, \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega_x \cdot \cos \varphi - \omega_y \cdot \sin \varphi.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $I_i$ ,  $\omega_i$  и  $M_i$  ( $i = x, y, z$ ) – соответственно моменты инерции капсулы, проекции её угловых скоростей вращения и проекции моментов на оси главной связанной системы координат;  $\psi, \varphi, \theta$  – углы Эйлера, определённые относительно геоцентрической непо-

движной системы координат;  $M_i = M_{\text{грав}} + M_{\text{аэ}} + M_{\text{эласт}}$ ;  $M_{\text{грав}}$  – гравитационный момент;  $M_{\text{аэ}}$  – аэродинамический момент;  $M_{\text{эласт}}$  – момент силы упругости троса.

При проектировании и эксплуатации спускаемых капсул, совершающих снижение в атмосфере (в том числе и на тросе), необходимо учитывать большую степень неопределённости при расчёте контролируемых характеристик их движения. Возникающая неопределённость вызвана погрешностью знания массово-инерционных характеристик капсулы (массовая асимметрия), неточностью знания начальных условий движения капсулы, ошибками в определении параметров системы управления. Указанные возмущения приводят к тому, что заданные условия движения капсулы при отделении от тросовой системы могут быть обеспечены лишь с определённой вероятностью. Поэтому при анализе движения капсулы на тросе необходимо оценивать вероятность нарушения заданных ограничений на её контролируемые характеристики движения. Основным методом оценки вероятностных характеристик движения капсулы является метод статистических испытаний.

В работе анализируются статистические характеристики движения рассматриваемой динамической системы: законы распределения углов нутации, атаки и угловой скорости для сферической капсулы с учётом наиболее полного набора действующих возмущений. Для большинства возмущающих воздействий статистические характеристики либо неизвестны, либо известны недостаточно полно, поэтому необходимо делать предположения о законах их распределения. Для случайных факторов, был принят ряд предположений о законах их распределения.

1. Проекция начальных угловых скоростей капсулы  $(\omega_{x_2}, \omega_{y_2}, \omega_{z_2})$  в связанных осях распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и со стандартным отклонением  $0,01 \text{ с}^{-1}$ .

2. Проекция начальных угловых скоростей КА  $(\omega_{x_1}, \omega_{y_1}, \omega_{z_1})$  в связанных осях распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и со стандартным отклонением  $0,002 \text{ с}^{-1}$ .

3. Начальные значения углов прецессии  $\psi$  и собственного вращения  $\varphi$  распределены равномерно на отрезке  $[0, 2\pi]$ . Начальное значение угла нутации  $\theta$  распределено равномерно на отрезке  $[0, 10 \text{ град}]$ .

4. Трос прикреплён к капсуле с некоторой ошибкой относительно её оси динамической симметрии  $(\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z)$ . Две координаты поперечного отклонения (относительно номинального направления, соединяющего центр масс тела и точку крепе-

ния) распределены нормально с нулевым математическим ожиданием и со стандартным отклонением равным  $0,01OB$ , где  $OB$  – номинальное расстояние между точкой крепления и центром масс капсулы.

5. Ошибки измерения длины троса  $\Delta L$  и скорости  $\Delta V$  распределены нормально с нулевыми математическими ожиданиями и со стандартными отклонениями, равными  $2 \text{ см}$  и  $2 \text{ см/с}$ , соответственно. Данные ошибки соответствуют ошибкам оптических датчиков в проекте YES2.

6. Ошибки работы механизма управления распределены нормально с нулевым математическим ожиданием и со стандартным отклонением, равным  $0,01\Delta T$ . Они аддитивно добавляются к значению управляющей силы  $\Delta T$  и разыгрываются с заданной дискретностью.

В результате статистического моделирования были получены гистограммы распределения угла нутации, угла атаки, модуля угловой скорости капсулы в конце процесса развёртывания тросовой системы. В качестве примера, на рис. 1 показана гистограмма распределения угла нутации при действии описанных возмущений. Его закон распределения близок к нормальному закону, усечённому слева.

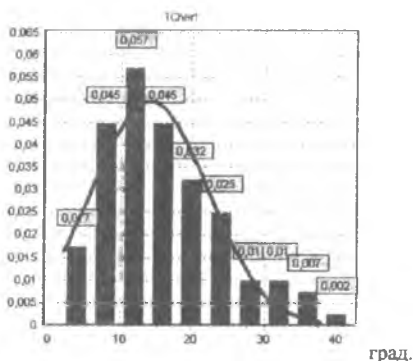


Рис. 1. Распределение угла нутации

Влияние различных возмущений было определено методом статистической линеаризации[4] и методом наименьших квадратов[5].

По результатам статистического анализа движения капсулы на тросе можно сделать следующие выводы:

1. При рассматриваемом уровне возмущений спуск капсулы на тросе можно осуществить с приемлемым уровнем ошибок в конце процесса развёртывания тросовой системы (стандартные отклонения по углу нутации и по модулю угловой скорости со-

ставляют соответственно 8,6 град. и 0,06 рад/с).

2. Наибольшее влияние на угол нугации оказывают ошибки, связанные с негочностью крепления троса к капсуле.

3. Ошибки работы системы управления дают достаточно большой вклад в полную дисперсию модуля угловой скорости капсулы (около 30%) в конце процесса развёртывания тросовой системы.

#### Библиографический список

1. Проект YES2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yes2.info/>, свободный.
2. Фефелов, Д.И. Моделирование и анализ развёртывания и снижения с околоземной орбиты тросовой системы со спускаемой капсулой [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.07.09: защищена 27.09.2007/ Фефелов Денис Иванович. – Самара: 2007. – 131 с.
3. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики [Текст]. В 2т. / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Дрофа, 2006.
4. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем [Текст]/ Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
5. Потасов, К.В. Статистический анализ экспериментальных данных [Текст] / К.В. Потасов. – М.: Мир, 2005. – 142 с.