

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ПОЛОЖЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ НАНОСПУТНИКА САМСАТ-ИОНОСФЕРА

Введение. В ноябре 2024 года с космодрома Восточный на орбиту был выведен наноспутник (НС) СамСат-Ионосфера, созданный в Самарском университете. НС предназначен для исследования ионосферы и магнитосферы Земли. Для проведения научных измерений НС должен соблюдать определённую ориентацию. Ввиду малых размеров и ограниченности энергетического запаса для наноспутников стандарта кубсат выгодно использовать пассивные или комбинированные системы стабилизации. Поскольку большинство НС выводятся на низкие околоземные орбиты, на которых преобладает влияние гравитационного и аэродинамического моментов, была выбрана пассивная трёхосная гравитационно-аэродинамическая стабилизация. При проектировании подобных систем, важным этапом является определение устойчивых положений углового равновесия НС.

Методика исследования. НС СамСат-Ионосфера имеет выносные элементы, что приводит к невозможности описания его аэродинамики аналитическими выражениями, в отличие от НС стандарта кубсат формы прямоугольного параллелепипеда.

Для НС, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, ранее в работах [1,2] были получены аналитические выражения для определения положений равновесия углового движения для двух частных случаев: смещения центра давления динамически симметричного НС от его центра масс по трём координатам; смещения центра давления НС с тремя разными главными моментами инерции от его центра масс по одной из главных осей инерции. Был разработан численный алгоритм определения положений равновесия для НС с недиагональным тензором инерции при смещении центра масс от геометрического центра по трём координатам [3].

В данной работе предложен алгоритм определения устойчивых положений равновесия НС стандарта кубсат, имеющего выносные конструкции.

Для описания движения МКА относительно центра масс введены две системы координат: траекторная система координат (ТСК) $OXYZ$ (совпа-

дающая с орбитальной в случае круговой орбиты) и связанная система координат (ССК) $Oxyz$, ось Ox которой направлена по продольной оси аппарата, оси Oy и Oz перпендикулярны его боковым сторонам. Связь между ТСК и ССК определяется с помощью углов Эйлера, где α_n – пространственный угол атаки, ψ – угол прецессии, ϕ – угол собственного вращения.

Движение МКА относительно центра масс в ССК можно описать следующими уравнениями:

$$J \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times J \vec{\omega} = \vec{M}^e, \quad \vec{\omega} = \vec{\alpha}_n + \vec{\phi} + \vec{\psi} + \vec{\omega}_{orb},$$

где J – тензор инерции МКА, $\vec{\omega}$ – абсолютная угловая скорость МКА, $\vec{\omega}_{orb}$ – орбитальная угловая скорость МКА, $\vec{M}^e = \vec{M}_a + \vec{M}_g$ – главный момент внешних сил, состоящий из суммы гравитационного, записанного в форме [4] и аэродинамического моментов.

Для определения параметров НС, необходимых для описания его аэродинамики, на межвузовской кафедре космических исследований Самарского университета, был разработан алгоритм определения аэродинамических характеристик (АДХ). С помощью разработанного алгоритма рассчитаны АДХ для НС СамСат-Ионосфера.

Проекции аэродинамического момента на оси ССК для НС, имеющего выносные конструкции, имеют вид:

$$\begin{aligned} M_{ax}^B &= qS \cdot (C_z y_d - C_y z_d), \\ M_{ay}^B &= qS \cdot (C_x z_d - C_z x_d), \\ M_{az}^B &= qS \cdot (C_y x_d - C_x y_d), \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} = A(\varphi)A(\alpha) \begin{bmatrix} C_{xa} \\ C_{ya} \\ C_{za} \end{bmatrix},$$

где C_{xa}, C_{ya}, C_{za} – коэффициенты аэродинамической силы в скоростной системе координат, C_x, C_y, C_z – проекции коэффициентов аэродинамической силы на ССК, x_d, y_d, z_d – координаты смещения центра давления относительно центра масс в ССК, представляющие собой табличные функции зависимости от ориентации НС относительно набегающего потока.

Для определения устойчивых положений равновесия НС СамСат-Ионосфера был разработан алгоритм поиска устойчивых равновесий НС стандарта кубсат, имеющего выносные конструкции схема которого приведена на рис. 1.

С помощью разработанного алгоритма были определены устойчивые положения равновесия для НС СамСат-Ионосфера.

На рис. 2 приведены графики зависимости углов Эйлера от времени, при моделировании движения из устойчивого положения равновесия, с использованием функции плотности динамической атмосферы NRLMSISE-00, взятой на 4 января 2025 года. Начальные параметры орбиты: $i_0 = 85^\circ$, $\Omega_0 = 115^\circ$, $u_0 = 0^\circ$, $p_0 = 6871$ км, где i – наклонение орбиты, Ω – долгота восходящего узла, u – аргумент широты.

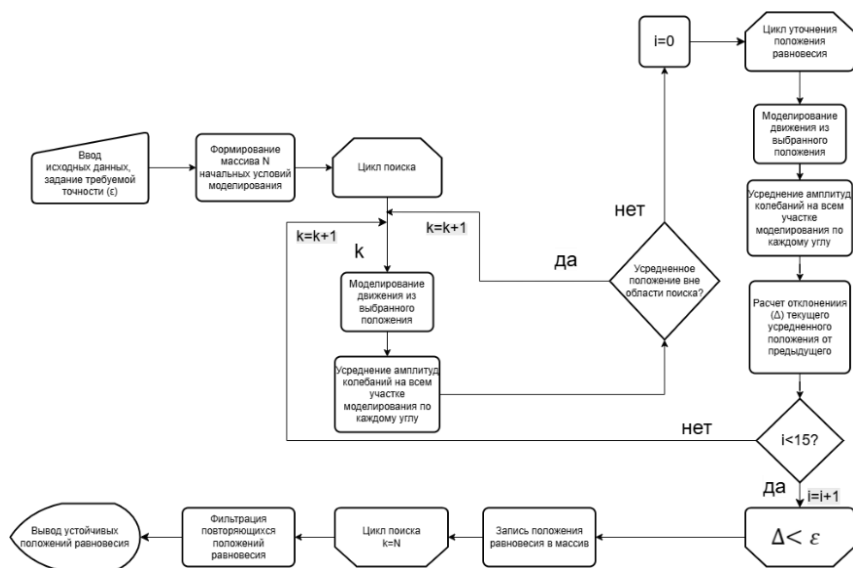


Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска устойчивых положений равновесия НС с выносными элементами конструкции

Опираясь на проведённое исследование, можно сделать вывод об успешной реализации системы пассивной трёхосной гравитационно-аэродинамической стабилизации на борту НС СамСат-Ионосфера.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

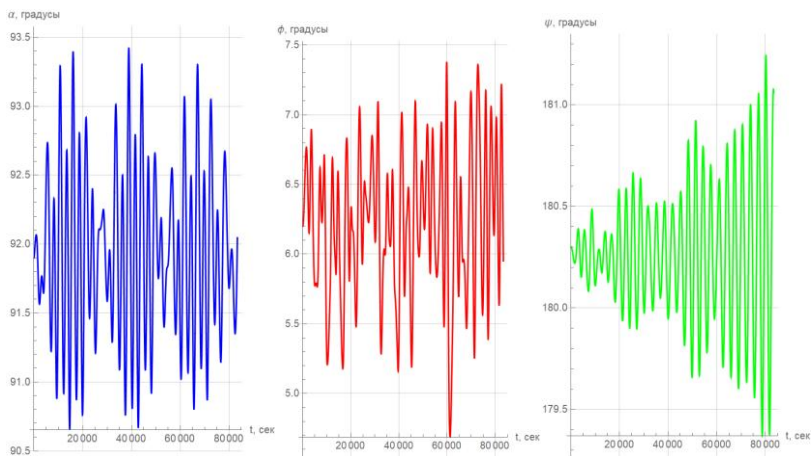


Рис. 2. Графики зависимости углов Эйлера от времени

Список использованных источников

1. Барина Е.В., Тимбай И.А., Исследование положений относительного равновесия динамически симметричного наноспутника формата CubeSat под действием гравитационного и аэродинамического моментов // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2019. – С. 123-126.

2. Барина Е.В., Тимбай И.А., Определение положений равновесия наноспутника формата CubeSat под действием гравитационного и аэродинамического моментов // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2020. – С. 148-151.

3. Барина Е.В., Тимбай И.А., Миронов Е. Численно-аналитическое определение положений равновесия наноспутника стандарта CubeSat под действием гравитационного и аэродинамического моментов // XXXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2024. – С. 403-406.

4. Барина Е.В., Белоконов И.В., Тимбай И. А. Предотвращение возможности возникновения резонансных режимов движения для низковысотных спутников класса CUBESAT // Гироскопия и навигация. – 2021. – Т. 29. №. 4. –С. 115.