

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ ПО ЗАДАНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

При проведении проектных расчетов по оценке массогабаритных и энергетических характеристик бортовых систем космических аппаратов (КА) в зависимости от этапа проектирования используют математические модели, различные по детальности анализа и точности расчета. В данной работе предлагаются математические модели и алгоритм для оценки массогабаритных характеристик силового гироскопического комплекса (СГК) КА детального наблюдения в зависимости от заданных показателей производительности КА. Предлагаемые модели и алгоритмы можно использовать для оценки массогабаритных характеристик СГК на начальных этапах проектирования.

1. Определение погребного управляющего момента

В качестве исходных данных используются следующие характеристики:

- производительность КА (количество снимков за виток) $N_{\text{он}}$;
- время целевой работы на витке $t_{\text{цв}}$;
- максимальное значение угла поворота оптической оси КА по углу крена $\gamma_{\text{вих}}$ от направления на надир;
- момент инерции КА $J_{\text{вд}}$ относительно оси, параллельной касательной к орбите и проходящей через центр масс КА.

Расчетная схема для оценки средней угловой скорости поворота КА в процессе целевой работы представлена на рис. 1.

На этой схеме введены следующие обозначения: АВ – линия по поверхности Земли; CD – отрезок, равный ширине полосы обзора; КО – направление в надир; EF – отрезок, равный среднему расстоянию, которое "пробегает" точка пересечения оптической оси телескопа КА по поверхности Земли в процессе перенацеливания КА.

Средний угол разворота КА при перенацеливании с одного объекта наблюдения на другой объект принимается равным половине угла поворота КА при перемещении линии ви-

зирования от крайней левой точки полосы обзора до крайней правой точки этой полосы, есть $\gamma_{cp} \approx \frac{2 \cdot \gamma_{max}}{2} = \gamma_{max}$.

Алгоритм расчета погрешного управляющего момента КА представлен ниже.

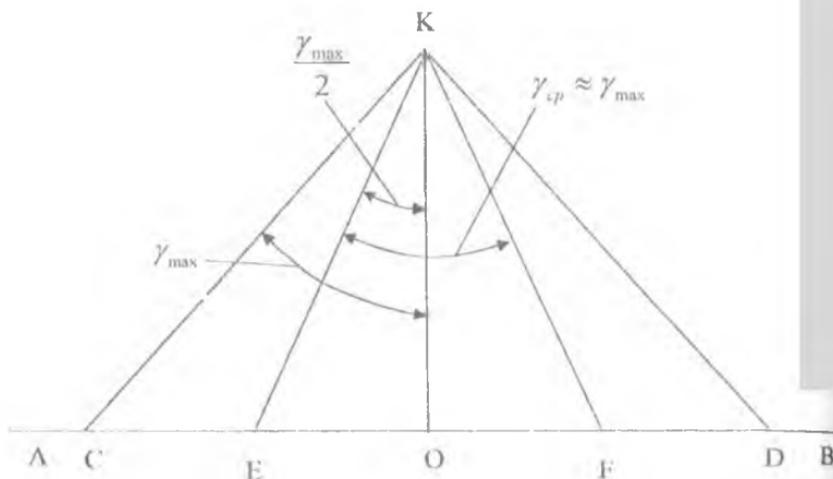


Рис. 1. Расчетная схема для оценки средней угловой скорости поворота КА в процессе целевой работы

1. Рассчитывается среднее время переориентации КА с одного объекта наблюдения на другой: $t_{пер} = \frac{t_{пр}}{N_{об}}$.

2. Рассчитывается средняя угловая скорость поворота КА: $\omega_{cp} = \frac{\gamma_{max}}{t_{пер}}$.

3. Рассчитывается максимальная угловая скорость КА, исходя из равноускоренного движения и нулевой (в среднем) начальной скорости поворота КА: $\omega_{max} = 2 \cdot \omega_{cp}$.

4. Определяется погрешное угловое ускорение: $\varepsilon_{max} = \frac{\omega_{max}}{t_{пер}}$.

5. Определяется погрешный управляющий момент: $M_{уп} = \frac{\varepsilon_{max}}{J_{КА}}$.

На начальных этапах проектирования точное значение момента инерции КА ($J_{КА}$) неизвестно. Поэтому вместо него в первом приближении можно использовать момент инерции гипотетического КА, имеющего форму цилиндра, относительно поперечной оси, проходящей через геометрический центр цилиндра. Длина и диаметр цилиндра принимаются равными средним значениям длины и диаметра проектируемого КА. Распределение массы гипотетического

ского КА по его объему принимается равномерным. Рассматриваемый момент инерции является наибольшим и поэтому считается критичным для выбора параметров СГК.

2. Выбор формы ротора силового гиросприбора

При выборе массогабаритных характеристик ротора силового гиросприбора (СГП) необходимо учесть влияние сразу двух факторов, влияющих на кинетический момент ротора — массы ротора и его габаритов. Задача заключается в выборе габаритов, формы и массы ротора СГП, обладающего заданным моментом инерции из условия минимизации массы ротора. Решение задачи облегчается наличием конструктивных ограничений.

Наибольший момент инерции при заданной массе и габаритах имеет ротор СГП в виде толстостенного цилиндра. Но ротор двухстепенного гироскопа должен одновременно поворачиваться и относительно другой оси вращения, которая располагается на рамке, имеющей форму части шаровой поверхности. Следовательно, ротор гиросприбора должен иметь форму шара с цилиндрическим отверстием по оси вращения (рис. 2).

Рассмотрим вопрос об оптимальных соотношениях размеров: радиуса ротора и радиуса цилиндрического отверстия в роторе СГП.

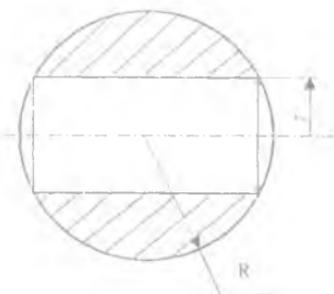


Рис 2. К вопросу о выборе формы ротора гиросприбора

Приблизительно момент инерции ротора гиросприбора можно рассчитывать, вычитая из момента инерции шара J_w момент инерции цилиндра J_n :

$$J_{СГП} = J_w - J_n \quad (1)$$

Моменты инерции шара и цилиндра определяются по известным зависимостям:

$$J_w = \frac{2}{5} m_w R^2 \quad \text{и} \quad J_n = \frac{1}{2} m_n r^2 \quad (2)$$

где m_w и m_n — массы шара и цилиндра, соответственно.

Выразим массы шара и цилиндра через их радиусы и плотность материала $\rho_{СГП}$:

$$m_w = \rho_{r111} \cdot V_w = \rho_{r111} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3, \quad (3)$$

$$m_q = \rho_{r111} \cdot V_n = \rho_{r111} \cdot \pi r^2 h \approx \rho_{r111} \cdot \pi r^2 \cdot 2R, \quad (4)$$

где V_w и V_n – объем шара и цилиндра, соответственно; h – высота (длина) цилиндра.

Подставляя (3) и (4) в (2) и далее в (1), можно прийти к следующей зависимости:

$$J_{r111} = \pi \cdot \rho_{r111} \cdot R \left(\frac{8}{15} R^4 + r^4 \right). \quad (5)$$

Петрудно также получить формулу и для приближенной оценки массы ротора:

$$m_{r111} \approx m_w + m_q = \pi \cdot \rho_{r111} \cdot R \left(\frac{4}{3} R^3 + 2 \cdot r^2 \right). \quad (6)$$

Результаты численных расчетов влияния отношения размеров ротора гиросприбора на относительные характеристики массы и момента инерции приведены на рис. 3.

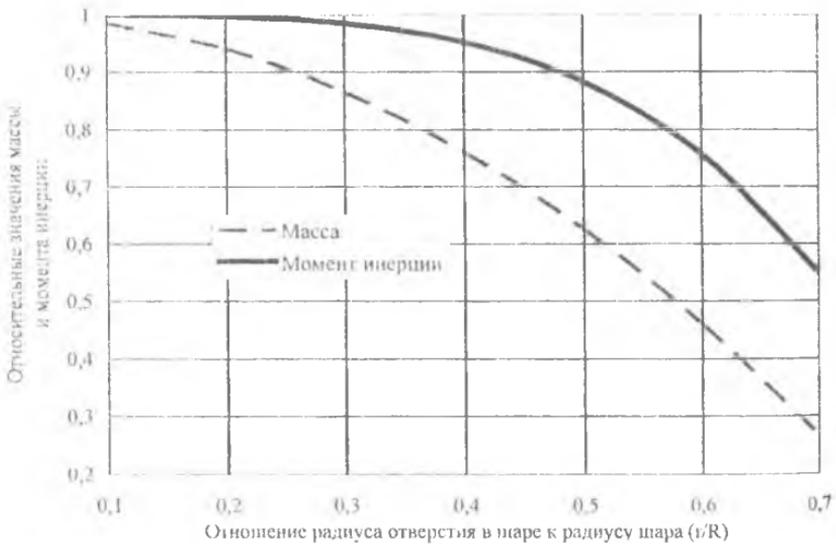


Рис. 3. Изменение относительных значений массы и момента инерции тела сферической формы с цилиндрическим отверстием в зависимости от отношения радиуса цилиндрического отверстия к радиусу сферы

Из анализа результатов следует, что отношение r/R лучше выбирать из диапазона 0,4...0,5, так как при этом момент инерции ротора уменьшается на 5...12% (по сравнению с моментом инерции ротора в форме сплошного шара), а масса ротора уменьшается на 24...38% (также по сравнению с массой ротора в форме шара).

При фиксированном отношении r/R момент инерции ротора и его масса однозначно определяются двумя параметрами: радиусом сферы, в которой «вращается» ротор, и плотностью конструкционного материала ротора. Так, для отношения $r/R = 0,5$ расчетные формулы (5) и (6) приобретают следующий вид:

$$J_{PIII} = \frac{113}{240} \pi \cdot \rho_{PIII} \cdot R^3, \quad (7)$$

$$m_{PIII} = \frac{5}{6} \pi \cdot \rho_{PIII} \cdot R^3. \quad (8)$$

Из выражения (7) можно получить зависимость для расчета радиуса ротора СИП:

$$R = \sqrt[3]{\frac{240}{113} \frac{J_{PIII}}{\pi \cdot \rho_{PIII}}}. \quad (9)$$

3. Оценка массогабаритных характеристик силового гироскопического комплекса

При разработке моделей приняты следующие допущения.

1. Поворот КА осуществляется относительно трех координатных осей тремя гиросприборами, при этом четвертый СИП находится в скользящем резерве.
2. Поворот КА относительно каждой оси осуществляется отдельным СИП. То есть, расчетный случай соответствует работе одного гиросприбора (два другие работают по другим осям стабилизации, а четвертый находится в динамическом резерве).
3. Угловая скорость вращения ротора СИП постоянна.
4. Вектор момента сил, прикладываемых к рамке СИП, перпендикулярен вектору кинетического момента ротора.
5. Угол поворота рамки СИП при прецессии ротора неограничен.
6. Моментом трения в узлах подвески рамки и ротора пренебрегаем.

В основу расчета положены следующие зависимости теории гироскопов [1].

$$1. K = J \cdot \omega, \quad (10)$$

где K , J и ω — кинетический момент, момент инерции и угловая скорость вращающегося тела, соответственно.

$$2. M_{\theta} = K_r \cdot \omega_{прец}, \quad (11)$$

где M_{θ} — момент внешних сил, прикладываемых к рамке двухстепенного гироскопа;

K_r — кинетический момент гироскопа,

$\omega_{прец}$ — угловая скорость прецессии гироскопа.

3. Зависимости для расчета момента инерции ротора гиросприбора в виде шара с цилиндрическим отверстием и массы ротора представлены формулами (7) и (8).

Ниже приведен алгоритм расчета массогабаритных характеристик СГК.

1. Момент силы, прикладываемый к внешней рамке двухстепенного гиросприбора $M_{СГК}$, принимается равным требуемому управляющему моменту $M_{уп}$, моменту силы, который необходим для поворота КА:

$$M_{СГК} = M_{уп}. \quad (12)$$

2. Задается (по статистическим данным прототипов) допустимая угловая скорость прецессии рамки СГК $\omega_{прец}$.

3. Рассчитывается требуемый кинетический момент ротора гиросприбора:

$$K_{СГК} = \frac{M_{уп}}{\omega_{прец}}. \quad (13)$$

4. Назначается (по статистическим данным прототипов) максимально возможная (достижимая) угловая скорость ротора гиросприбора $\omega_{рпг}$.

5. Определяется требуемый момент инерции ротора гиросприбора:

$$J_{рпг} = \frac{K_{СГК}}{\omega_{рпг}}. \quad (14)$$

6. Определяется радиус ротора гиросприбора по формуле (9).

7. Определяется масса ротора гиросприбора по формуле (8).

8. Проверяется условие прочности ротора гиросприбора в зависимости от скорости вращения по следующему критерию:

$$\sigma \leq [\sigma], \quad (15)$$

где σ - окружное напряжение в роторе гиросприбора, которое определяется по формуле, известной из теории прочности:

$$\sigma = f \cdot \rho_{рпг} \cdot R^2 \cdot \omega_{рпг}^2, \quad (16)$$

где f - коэффициент безопасности.

9. Определяется масса СГК по следующей зависимости:

$$m_{СГК} = k_1 \cdot m_{рпг}, \quad (17)$$

где k_1 - статистический коэффициент (превышения массы СГК над массой ротора).

10. Определяется масса блока электроники СГК:

$$m_{эвСГК} = k_2 \cdot m_{СГК}. \quad (18)$$

где k_2 – статистический коэффициент (доля массы электроники от массы СГП).

11. Определяется масса одного СГП с блоком электроники:

$$m_{сгп} = m_{сгп} + m_{электроника} \quad (19)$$

12. Определяется масса СГК, состоящего из четырех СГП и четырех блоков электроники:

$$m_{сгк} = 4 \cdot m_{сгп} \quad (20)$$

Габариты гиросприборов оцениваются на основе введения статистических коэффициентов превышения размеров корпуса гиросприбора (статора) над размерами ротора, а объемы блоков электроники рассчитываются по плотности компоновки типовых приборов.

Таким образом, разработаны математические модели и алгоритмы для оценки массогабаритных характеристик силового гироскопического комплекса КА детального наблюдения в зависимости от заданных показателей производительности. Предлагаемые модели и алгоритмы можно использовать на начальных этапах проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов Ю.В., Титов Б.А. Системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие. – Самара: Самар. авиац. ин-т., 1992.