

Л. В. ШИПУЛИНА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
О. А. ТАТАРИНОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Ю. Н. КОРЫТКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА ОРИЕНТАЦИЮ

Рассматривается задача управления переориентацией космического аппарата с помощью минимально-избыточного гироскопического комплекса. Для определения управляющих скоростей прецессии гироскопов использовалась опорная сферическая модель в кватернионной форме с учетом ограничения на ориентацию. Приведено графическое изображение изменения угловых скоростей гироскопов при минимальном времени переориентации.

Ключевые слова: переориентация, гироскопический комплекс, опорная сферическая модель, угловые скорости.

Введение. Предлагаются два алгоритма управления переориентацией космического аппарата с помощью минимально-избыточного гироскопического компланарной и тетраэдрной конфигурации. Проведено численное моделирование и даны рекомендации по использованию разработанных алгоритмов.

Постановка задачи. Рассматривается управление переориентацией космического аппарата (КА) с помощью избыточной системы гироскопов (СГК) при условии, что полуось \vec{z} КА в течение маневра не должна заходить в область ограничений, заданную конусом с осью \vec{k} и углом полурастра δ .

Угловое движение КА описывается системой динамических и кинематических уравнений [1]:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{K}} + \dot{\vec{H}} &= \vec{M}; \\ \dot{\Lambda} &= \frac{1}{2} \Lambda \circ \vec{\omega},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\vec{K} = I\vec{\omega}$ и \vec{H} – кинетические моменты твердого тела и системы гироскопов;

\vec{M} – внешний момент;

Λ – кватернион, определяющий угловое положение КА относительно опорного базиса;

$\vec{\omega}$ – угловая скорость КА в проекциях на связанный базис.

Решение задачи управления переориентацией космического аппарата. Управление переориентацией осуществляется путем выбора управляющих скоростей прецессии гироскопов (ГД), реализующих производ-

ную потребного кинетического момента $\dot{\bar{H}}_i = \bar{M} - \bar{K}$ и переводящих КА из заданного начального в конечное состояние за время T :

$$\begin{aligned} t=0: \quad \Lambda_0 &= \lambda_0 + \bar{\lambda}, \quad \bar{\omega}_0; \\ t=T: \quad \Lambda_T &= (1,0,0,0), \quad \bar{\omega}_T \end{aligned} \quad (2)$$

Ввиду того, что решение кинематического уравнения (1) в общем случае не может быть найдено в аналитической форме, для реализации режима переориентации используется опорная сферическая модель в кватернионной форме [1–3]:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \Lambda_1 \circ \Lambda_2 \circ \Lambda_3, \quad \Lambda_i = c_i + \bar{b}_i s_i, \quad |\bar{b}_i| = 1, \\ c_i &= \cos \frac{\Psi_i}{2}, \quad s_i = \sin \frac{\Psi_i}{2}, \quad i = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

Векторы \bar{b}_i и зависимости $\Psi_i(t)$ выбираются из условия удовлетворения краевым условиям (2) и ограничению на ориентацию, что позволяет в каждый текущий момент времени t определять $\Lambda(t)$, $\bar{\omega}(t)$, $\dot{\bar{\omega}}(t)$, $\dot{\bar{H}}_i$ и реализовать $\dot{\bar{H}}_i$ системой гироскопов [2].

Для определения управляющих скоростей прецессии гироскопов, реализующих $\dot{\bar{H}}_i$, рассматривался минимально-избыточный гироскопический комплекс, состоящий из четырех гироскопов, образующих компланарную или тетраэдрную конфигурацию [3].

При компоновке четырех гироскопов в компланарную систему с попарно параллельными осями прецессии, изменение суммарного вектора кинетических моментов ГД определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{x1} &= -\dot{\beta}_1 \sin \beta_1 + \dot{\beta}_3 \sin \beta_3, \\ \dot{H}_{y1} &= -\dot{\beta}_2 \sin \beta_2 + \dot{\beta}_4 \sin \beta_4, \\ \dot{H}_z &= \dot{\beta}_1 \cos \beta_1 - \dot{\beta}_3 \cos \beta_3 + \dot{\beta}_2 \cos \beta_2 - \dot{\beta}_4 \cos \beta_4, \end{aligned} \quad (3)$$

где β_i ($i = \overline{1, 4}$) – углы отклонения кинетических моментов ГД от плоскости осей прецессии xu ;

$\dot{\beta}_i$ – угловые скорости прецессии ГД;

x_1, y_1 – оси прецессии ГД, располагающиеся под углом 45° к связанным осям x, y КА;

$\dot{H}_{x1}, \dot{H}_{y1}, \dot{H}_z$ – проекции $\dot{\vec{H}}_j$ [4].

Кинетический момент \vec{H} , создаваемый СГК тетраэдрной конфигурации, в проекции на оси связанной системы координат имеет вид [3, 5]:

$$H_k = \sum_{i=1}^4 (a_{ki} \cos \beta_i + b_{ki} \sin \beta_i), \quad k = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где a_{ki}, b_{ki} – постоянные коэффициенты, определяемые по компонентам нормалей к граням тетраэдра;

β_i – углы прецессии гиридинов.

Продифференцировав (4) по времени, получим проекции $\dot{\vec{H}}_j$ на оси связанной системы координат:

$$\dot{H}_k = \sum_{i=1}^4 \dot{\beta}_i d_{ki}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (5)$$

$$d_{ki} = -a_{ki} \sin \beta_i + b_{ki} \cos \beta_i.$$

Левые части уравнений (3) и (5) известны (рассчитываются по опорной модели), поэтому можно определить управляющие скорости прецессии гиридинов $\dot{\beta}_i$. Но так как уравнений всего три, а неизвестных $\dot{\beta}_i$ четыре, то системы (3) и (5) необходимо дополнить еще одним уравнением. Дополнительное уравнение можно получить из условия:

$$\dot{\beta}_4 - \dot{\beta}_2 = \dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_1, \quad (6)$$

которое выражает равномодульное приращение углов между кинетическими моментами ГД каждой пары на такте управления Δt [6]. Выполнение условия (6) приводит к тому, что при вырождении уравнений одной пары ГД (при угле между кинетическими моментами ГД, равном нулю или 180°) управление осуществляется в основном второй парой, за счет чего первая пара быстро проходит критическую точку.

Разрешая систему уравнений (3) с условием (6) и систему (5) с (6) относительно $\dot{\beta}_i$, получаем управляющие скорости прецессии гиридинов.

Проведено численное моделирование режима переориентации с использованием компланарной и тетраэдрной конфигураций СГК.

На рис. 1 и рис. 2. приведено изменение угловых скоростей прецессии гиридинов. Было найдено минимальное время переориентации T , при котором выполняется ограничение на скорость прецессии ГД $|\dot{\beta}_i| \leq \dot{\beta}_{\max}$.

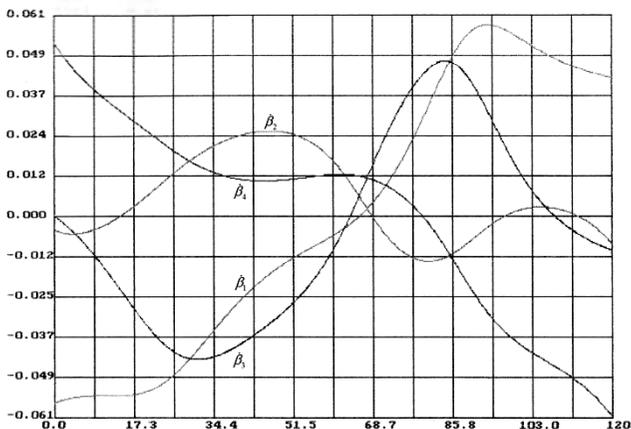


Рис. 1 – Угловые скорости прецессии гиродинов для компланарной конфигурации

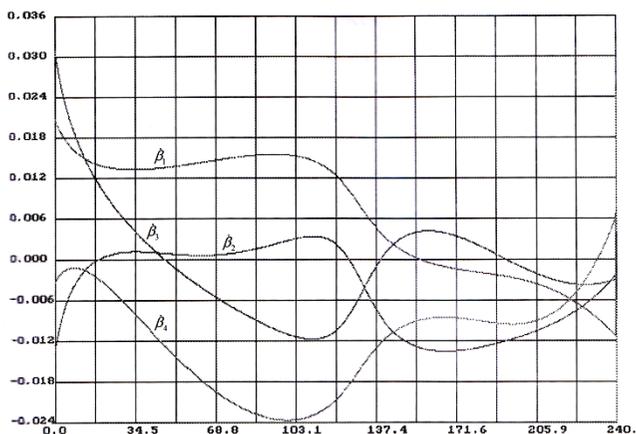


Рис. 2 – Угловые скорости прецессии гиродинов для тетраэдрной конфигурации

Выводы. Сравнивая результаты для компланарной и тетраэдрной конфигурации СГК-4, можно отметить, что для компланарной схемы время переориентации вдвое меньше, чем для тетраэдрной схемы. Это объясняется тем, что для компланарной схемы алгоритмы управления гиродинами являются более простыми и одновременно более эффективными вследствие простой геометрической организации системы, допускающей наглядную интерпретацию поведения коллинеарных пар ГД в ходе управления.

Заклучение. Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять режим переориентации с учетом ограничения на угловую скорость прецессии гироскопов. Показано, что применение компланарной конфигурации гироскопов является более эффективной и предпочтительной для практического использования.

Список литературы: 1. *Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 320 с. 2. *Шипулина Л. В., Овчарова Д. К.* Управление разворотом космического аппарата при ограничении на ориентацию. // Вестник ХГПУ: Сб. науч. трудов. Выпуск 57. – Х.: ХГПУ, 1999. – С. 79–81. 3. *Успенский В. Б.* Теоретические основы гиросилового управления ориентацией космического летательного аппарата: Монография. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 328 с. 4. *Шипулина Л. В., Середа Н. В.* Алгоритмы управления минимально избыточной гироскопической системой при разворотах космических аппаратов по опорным моделям. – Х., 1991. – 12 с. Деп. В УкрНИИИТИ № 1114-Укр91. 5. *Успенский В. Б., Малышев К. М.* Методика оптимизации структуры силового гироскопического комплекса // Механика и машиностроение. – 1999. – № 2. – С. 125–131. 6. *Карначев Ю. А., Павловский М. А.* Равномодульное управление минимально избыточной компланарной структурой гироскопов с ортогонально ориентированными осями подвеса гироскопов. // Механика гироскопических систем. – К., 1986. – № 5.

Поступила в редколлегию 15.10.2013

УДК 629.783

Управление переориентацией космического аппарата с ограничением на ориентацию / Л. В. Шипулина, О. А. Татарина, Ю. Н. Корытко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 48–52. – Бібліогр: 6 назв.

Розглядається задача управління переорієнтацією космічного апарату за допомогою мінімально-надлишкового гідрокомплексу. Для визначення управляючих швидкостей прецесії гіроскопів використовувалась опорна сферична модель у кватерніонній формі з урахуванням обмеження на орієнтацію. Наведено графічне зображення зміни кутових швидкостей гіроскопів при мінімальному часі переорієнтації.

Ключевые слова: переориентация, гидрокомплекс, опорная сферическая модель, кутовые швидкості.

The problem of the control of the space vehicle reorientation is considered in the paper with using minimal redundant gyrocomplex. The abutting spherical model in quaternion form was used for defining the control velocities of the gyrodynes precession. Graphic plots of the gyrodynes angular velocities changing is presented for minimal reorientation time.

Keywords: reorientation, gyrocomplex, abutting spherical model, angular velocities.