

НОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ МЕХАНИЗМА «БЫСТРОГО» ПОВОРОТА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.Я. Геча, Д.В. Гриневич, Н.А. Красова,
И.А. Мещихин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Статья посвящена идее разработки нового технического решения механизма «быстрого» поворота малого космического аппарата. Приводится теоретическое обоснование, аналитическое решение и численное моделирование. Возможность реализации «быстрого» поворота была подтверждена.

Ключевые слова: космический аппарат, система ориентации, «быстрый» поворот.

Введение

Космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используемые для изучения природных ресурсов Земли и решения задач метеорологии, оснащаются сложной оптической или радиолокационной аппаратурой. В свою очередь качество получаемых снимков в результате дистанционного зондирования зависит от точности угловой стабилизации, а полнота получаемых данных от времени программного поворота.

Используемые в настоящее время системы ориентации (СО) зачастую не могут одновременно обеспечить выполнение требований по стабилизации и «быстрому» повороту КА. Под «быстрым» поворотом будем понимать поворот КА, осуществляемый за значительно меньшее время (разница в несколько раз и до порядка), чем время поворота, осуществляемого «медленными» традиционными исполнительными органами:

- гиросиловые системы способны осуществлять быстрые маневры КА вокруг центра масс, но менее точные по угловой стабилизации, чем маховичные;
- маховичные системы, наиболее широко применяемые на КА ДЗЗ разработки ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», обеспечивают хорошую точность угловой стабилизации, но являются довольно медленными, с точки зрения программного поворота.

Это привело к идее разработки нового исполнительного органа системы ориентации, предназначенного только для осуществления «быстрого» поворота КА. Маховичная система ориентации, освобожденная от задачи поворота КА, может быть оптимизирована по моменту, массе, габаритам, что улучшит точность стабилизации.

Увеличение момента инерции исполнительного органа позволит увеличить быстродействие системы ориентации КА. Наилучшим, из всех возможных, отношением момента инерции к массе исполнительного органа является кольцевая форма с максимальным, исходя из габаритов КА, радиусом.

Таким образом, исполнительный орган, выполненный в качестве кольца, описанного вокруг КА, является наилучшим, с точки зрения обеспечения быстродействия СО. Как пример приведём эскиз КА типа «Университетский – Татьяна-2» с подобным исполнительным органом (рис. 1).

Теоретическое обоснование возможности «быстрого» поворота

Для теоретического обоснования возможности осуществления «быстрого» поворота решалась идеализированная задача. Спутник рассматривался как шар с исполнительным органом в виде охватывающего его кольца. Был проведён аналитический и численный расчёт.

При приведении кольца в движение для замкнутой системы применим закон сохранения момента импульса, откуда получаем зависимость поворота сферы от поворота кольца.

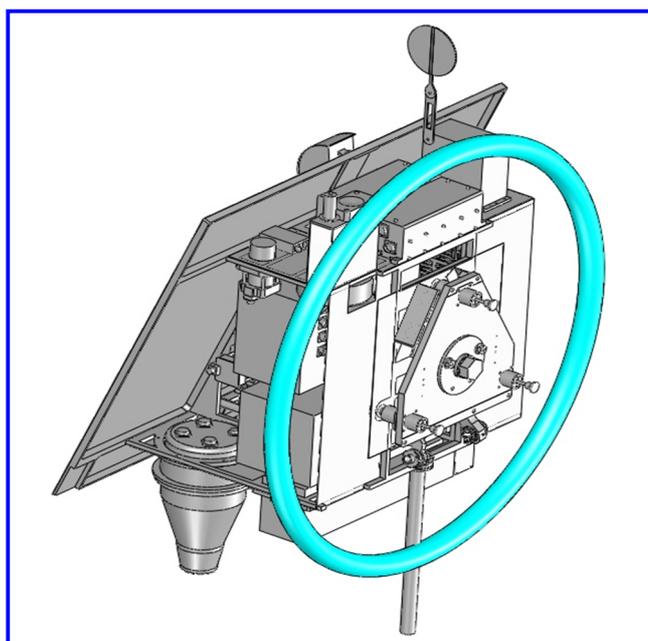


Рис. 1. Эскиз КА типа «Университетский – Татьяна-2» с ИО «быстрого» поворота

Момент импульса твёрдого тела относительно оси есть сумма моментов импульса отдельных его точек. Учитывая связь между линейной и угловой скоростями,

$$v_i = \omega r_i,$$

где v_i – линейная скорость i -го тела; ω – угловая скорость; r_i – радиус кривизны траектории движения тела), получим следующее выражение для момента импульса L_z тела относительно неподвижной оси:

$$L_z = \omega \sum_{i=1}^n m_i r_i = I_z \omega,$$

где m_i – масса; I_z – момент инерции), т. е. момент импульса твёрдого тела относительно оси равен произведению момента инерции тела относительно той же оси на угловую скорость.

Так из закона сохранения момента импульса получаем следующее уравнение для нашей системы:

$$I_{sphere} \frac{d\omega_{sphere}}{dt} + I_{ring} \frac{d\omega_{ring}}{dt} = 0,$$

где I_{sphere} – момент инерции сферы; I_{ring} – момент инерции кольца; ω_{sphere} – угловая скорость сферы; ω_{ring} – угловая скорость кольца.

Из уравнения получаем зависимость угловых скоростей

$$\omega_{sphere} = -\frac{I_{ring}}{I_{sphere}} \omega_{ring},$$

и получаем соотношение взаимосвязи угловых скоростей двух тел – сферы и кольца:

$$\omega_{sphere} = -\frac{5m_{ring}}{2M_{sphere}} \omega_{ring}.$$

Рассмотрим пример со следующими параметрами системы: масса шара 100 кг; масса исполнительного органа (кольца) 5 кг; диаметр шара 1 м. Получаем зависимость угловой скорости шара от угловой скорости кольца:

$$\omega_{sphere} = -0,125\omega_{ring}.$$

Управляющий момент зададим синусом (см. рис. 2):

$$M(t) = M_0 \sin kt,$$

где M_0 – амплитуда момента; $k = 2\pi/T$; T – время поворота (один период).

Из уравнения $I_z \frac{d\omega}{dt} = M_z$ угловая скорость будет рассчитана как интеграл от момента:

$$\omega(t) = \frac{1}{I} \int M(t) dt.$$

В итоге получаем уравнение для угловой скорости:

$$\omega(t) = \frac{-M_0}{kI} \cos kt + \frac{M_0}{kI}.$$

Угол рассчитывается как интеграл от угловой скорости:

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \frac{-M_0}{k^2 I} \sin kt + \frac{M_0}{kI} t.$$

Управляющему моменту, показанному на рис. 2, согласно приведённым уравнениям, будет соответствовать угол поворота КА, изображённый на рис. 3.

Таким образом, с использованием исполнительного органа массой 5 кг, прикладывая управляющий момент амплитудой 1 Н·м, можно совершить поворот КА на угол 90° за 10 с.

Численное решение было получено путём моделирования программного поворота КА в системе кинематического анализа Adams.

Расчётная схема имеет следующий вид: однородный шар с прикреплённым исполнительным органом в виде кольца (см. рис. 1). Тела соединены шарниром, позволяющим свободно совершать вращение тел относительно друг друга вокруг вертикальной оси. Между телами прикладывался момент.

Параметры численной модели КА (масса, размеры) соответствуют аналитической модели, параметры органа управления варьировались.

К исполнительному органу приложен управляющий момент (рис. 2). За время $t = 10$ с момент амплитуды $M_0 = 1$ Н·м поворачивает КА на 90° (см. рис. 3), исполнительный орган поворачивается массы $m = 5$ кг совершает два оборота, результат полностью соответствует аналитической модели.

Поварьируем массу исполнительного органа (табл. 1) и получим различное количество его оборотов, необходимых для осуществления поворота КА на 90°.

На рис. 5 приведена зависимость количества оборотов исполнительного органа различной массы, необходимого для осуществления поворота КА на 90°.

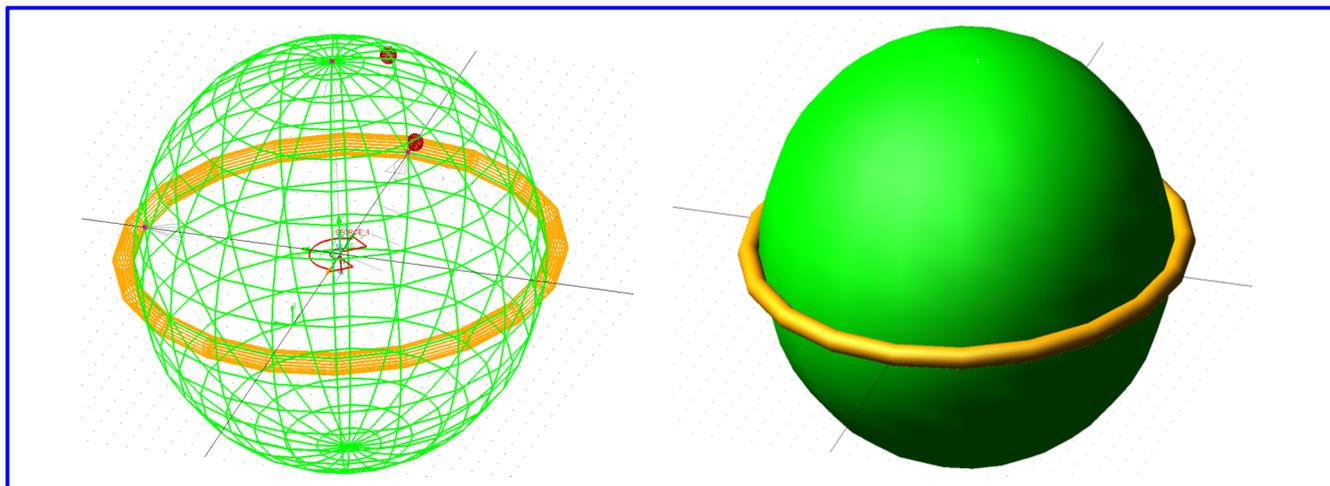


Рис. 2. Расчётная модель в Adams

Таблица 1

№	Масса исп. органа, кг	Момент инерции, кг·м ²	Количество оборотов исполнительного органа
1	1	0,276	9,26
2	2	0,552	4,5
3	3	0,828	3
4	5	1,38	1,8
5	10	2,76	0,92

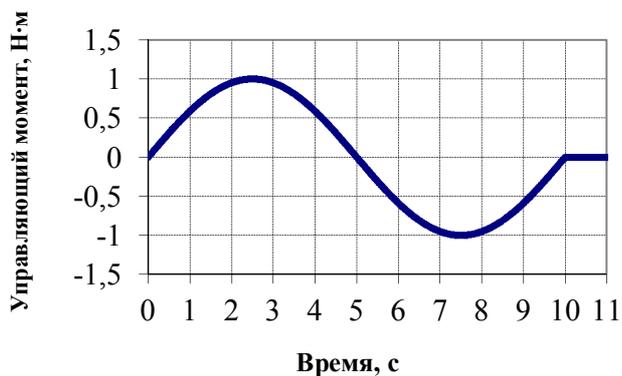


Рис. 3. Управляющий момент

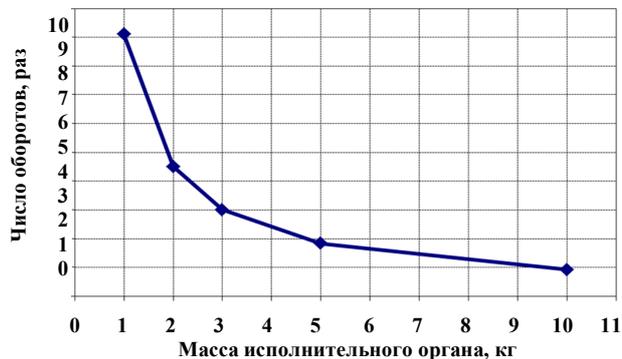


Рис. 5. Зависимость необходимого числа оборотов ИО от его массы

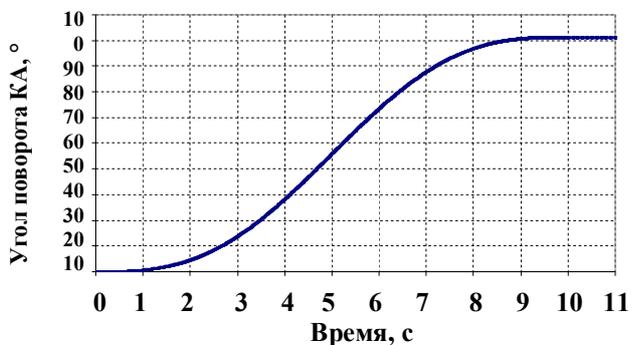


Рис. 4. Угол поворота КА

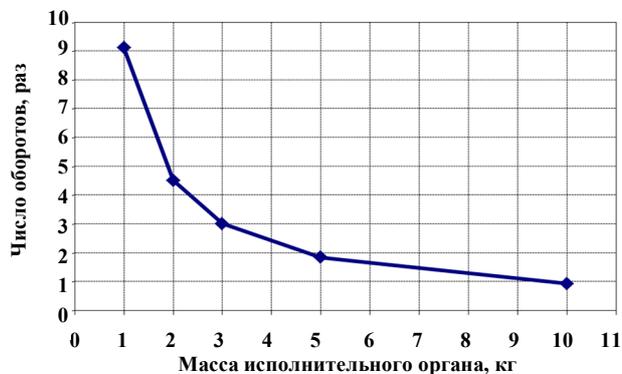


Рис. 6. Зависимость времени поворота КА на 90° от амплитуды момента

Увеличение массы исполнительного органа ведёт к увеличению его момента инерции и, соответственно, уменьшению необходимого для совершения манёвра числа поворотов.

Время поворота КА зависит от амплитуды управляющего момента, их зависимость приведена на рис. 6. Увеличивая амплитуду, мы сокращаем время программного поворота КА.

Оценка частоты вращения приводного устройства

Вращение обода исполнительного органа может быть осуществлено различными способами. Среди вариантов можно указать механический привод, электромагнитное воздействие.

Конструкция с механическим приводом является самым простым вариантом, хоть и не лишённым некоторых недостатков (трение ролика, его износ, проблема уверенного контакта поверхностей, возникающие вибрации, выход из строя привода и прочее). Однако простота конструкции даёт хорошую возможность дублирования привода. На рис. 7 изображена схема возможного расположения привода. Рассчитаем необходимую частоту вращения привода. Передаточное отношение системы равно обратному отношению радиусов элементов передачи:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1},$$

где n_1 – частота вращения обода; n_2 – частота вращения привода; $r_1 = 50$ см – радиус обода; $r_2 = 1$ см – радиус привода (зададимся данным условным значением).

Отсюда частота вращения привода вычисляется по формуле:

$$n_2 = \frac{r_1}{r_2} n_1.$$

Для частоты вращения обода $n_1 = 1$ об/с = 6 об/мин частота вращения привода составит: $n_2 = 300$ об/мин.

Учитывая, что современный условный привод обеспечивает $n = 3000$ об/мин, получаем, что существует возможность использования механического

привода со встроенным редуктором с передаточным числом $i=10$, обеспечивающим выходную частоту вращения $n_2 = 300$ об/мин. Размеры такого привода будут незначительны в сравнении с размерами конструкции.

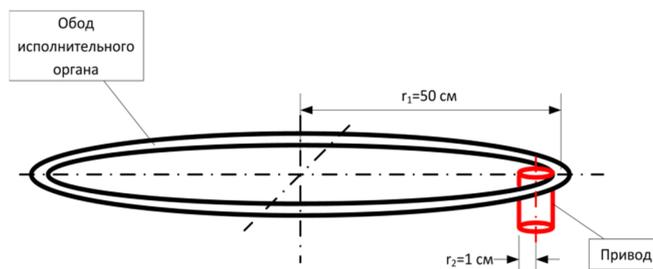


Рис. 7. Схема привода исполнительного органа

Оценка параметров работы ИО при выполнении «быстрого» поворота

В заключение приведём параметры работы предлагаемого ИО (расчётная модель приведена на рис. 1) при повороте КА с исполнительным органом массой 10 кг на угол 90°.

Массовые характеристики разрабатываемого ИО не влияют на время поворота, а влияют только на число оборотов самого ИО. Время поворота зависит от амплитуды управляющего момента, создаваемого ИО.

Различные значения амплитуды момента, необходимые для поворота КА на 90° за определённое время, указаны в табл. 2.

На рис. 8 представлены зависимости амплитуды момента, работы и средней мощности от времени совершения манёвра.

Заключение

В ходе работы путём аналитического и численного моделирования подтверждена возможность «быстрого» программного поворота малого КА. Проанализированы параметры массы (момента инерции) исполнительного органа, управляющего момента и времени выполнения манёвра, что в дальнейшем позволит обоснованно выбрать параметры привода исполнительного органа.

Таблица 2

Параметры работы исполнительного органа

№	Амплитуда момента, Н·м	Время поворота, с	Работа*, Дж	Средняя мощность, Вт
1	3,9	5	14	2,8
2	1,75	7,5	6,3	0,8
3	1	10	3,7	0,4
4	0,44	15	1,6	0,1

*Возможна рекуперация.

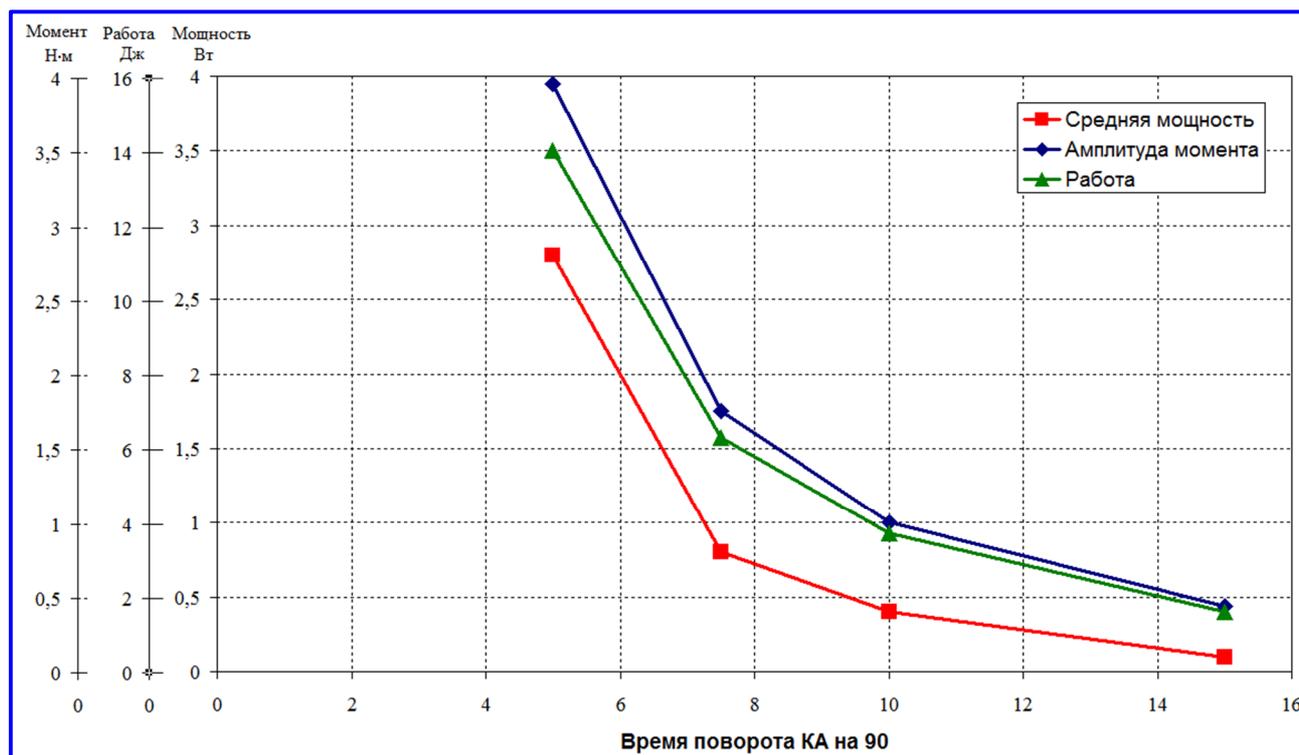


Рис. 8. Зависимость амплитуды момента, мощности и работы от времени совершения манёвра

Использование ИО нового типа даёт существенный выигрыш по времени поворота при совершении существенно меньшей работы. Масса предлагаемого ИО одного порядка с рассмотренными аналогами.

Кроме того, стоит отметить дополнительные преимущества предлагаемого ИО:

– простота регулировки – контроль движения осуществляется только по начальному и конечному положению разрабатываемого ИО;

– не осуществляется контроль за несколькими параметрами системы, необходимый для маховиков, имеющих небаланс и высокую частоту вращения;

– отсутствие воздействия на КА после завершения манёвра.

Применение нового исполнительного органа даёт возможность разделить функции программного поворота КА и его стабилизации между разными исполнительными органами.

Литература

1. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
2. Иванов А. А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования : Учебное пособие . – MSC. Software Corporation, 2003. – 97 с.
3. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. – М. : АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.

Поступила в редакцию 04.03.2014

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, заместитель директора,
т. (499) 365-26-69.

Дмитрий Владимирович Гриневич, мл. научн. сотрудник,
т. (945) 366-33-61.

Наталья Алексеевна Красова, мл. научн. сотрудник,
т. (945) 366-33-61.

Илья Александрович Мешихин, мл. научн. сотрудник,
т. (495) 366-33-61.

E-mail: vniiev@mail.ru.