

# СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ ГРУППОВОГО ОТДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ БЛОКА ВЫВЕДЕНИЯ ДЛЯ РАЗНЫХ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ

к.т.н., доцент Круглов Г. Е., к.т.н., доцент Юдинцев В. В.

ОАО «Ракетно-космический центр «Прогресс»

yudintsev@classmech.ru

Малые космические аппараты (МКА), построенные с использованием современной элементной базы, позволяют решать широкий круг задач, ранее доступный только «большим» КА. Это задачи дистанционного зондирования Земли, комплексные исследования околоземного пространства и земной атмосферы, отработка новых алгоритмов и бортовых систем для «больших» КА и даже задачи по уборке космического мусора [1]. Наиболее перспективна с практической точки зрения разработка технологий построения малых КА с массой около 500 кг, которые позволяют использовать для решения поставленных задач большой объём бортовой аппаратуры и имеют большой срок активного существования в сравнении с МКА меньшей массы.

Для снижения стоимости выведения МКА целесообразно на орбитальной ступени РН или блоке выведения (БВ) устанавливать несколько МКА. Доставка на орбиту МКА формата Cubesat или МКА массой до 100 кг может быть выполнена попутно с выведением «большого» космического аппарата [2], а при выведении нескольких МКА массы 500 кг необходима разработка специальных адаптеров для их совместного выведения на орбиту и отделения.

Безопасное отделение нескольких МКА от БВ это сложная задача для успешного реализации которой необходимо решить целый комплекс задач:

- 1) формирование требований к ориентации и стабилизации БВ на момент отделения МКА;
- 2) построение безопасной циклограммы отделения МКА;
- 3) детальный анализ динамики относительного движения МКА и БВ на этапе работы средств отделения;
- 4) обеспечение точности работы средств отделения;
- 5) анализ относительного орбитального движения МКА после их отделения;
- 6) минимизация возмущений средств отделения на движение БВ.

При отделении нескольких МКА необходимо сформировать требования к ориентации и стабилизации БВ на момент отделения, которые позволяют обеспечить безударное относительное орбитальное движение всех МКА и БВ. Эти требования зависят от расположения МКА на адаптере БВ и направления их отделения. Для решения этой задачи можно использовать известные уравнения относительного орбитального движения [3,4], которые для круговой орбиты могут быть линеаризованы и решены аналитически [5]. На рис. 1 представлена возможная схема отделения четырёх и шести КА в плоскости орбиты. Для безударного отделения необходимо определить оптимальное значение угла  $\alpha_1$ , которое обеспечивает максимальную разницу между проекциями приращений скоростей  $u_i$  всех МКА на направление орбитальной скорости БВ –  $V_0$  [5].

При невозможности одновременного отделения нескольких МКА, например когда направления отделения МКА совпадают, необходимо формирование циклограммы последовательного отделения МКА и также формирование требований к ориентации и стабилизации БВ. На рис. 2 представлена схема отделения нескольких МКА при помощи устройства отделения – 3, установленного на адаптере БВ – 1, выводимых совместно с основной полезной нагрузкой – 2. Пример технической реализации этой схемы (Nanosatellite Launch Adapter System) представлен в [6].

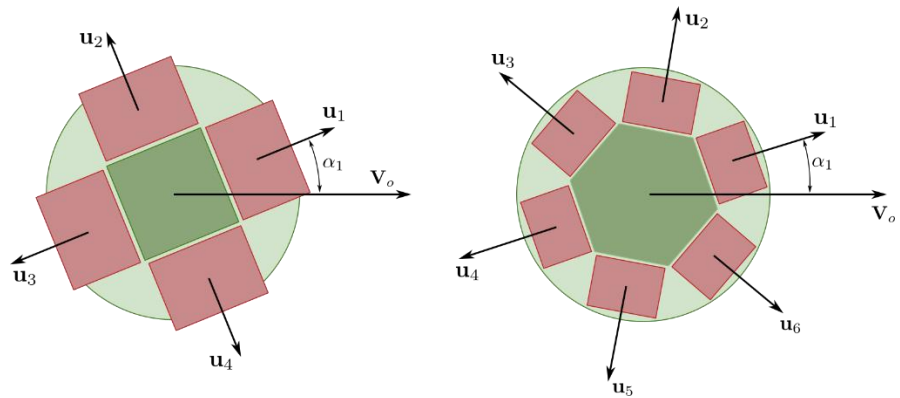


Рисунок 1 – Отделение четырех и шести МКА от БВ

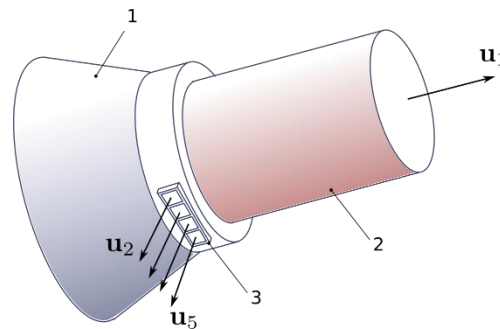


Рисунок 2 – Отделение МКА от БВ в одном направлении

Наибольшую сложность представляет задача отделения нескольких МКА, габариты которых не позволяют разместить их так, чтобы угол между направлениями приращения их скоростей был достаточно большим для исключения возможности столкновения МКА на этапе «ближнего» движения, включая этап работы средств отделения. Одна из таких схем представлена на рис. 3. Два МКА размещаются таким образом, чтобы с одной стороны они находились внутри допустимой зоны под головным обтекателем РН, с другой – обеспечивался бы максимальный угол между направлениями их отделения от БВ. Для безударного орбитального движения МКА при использовании такой схемы продольная ось БВ может быть повернута к направлению орбитальной скорости БВ для обеспечения разных проекций приращений скоростей МКА на направление полёта. При отделении МКА разной массы возможно построение безударного отделения МКА за счет разных приращений скоростей  $u_1$ ,  $u_2$ , формируемых средствами отделения.

Использование схемы, представленной на рис. 3, требует высокой точности циклограммы отделения МКА. Разновременной раскрытия поперечных стыков МКА в некоторых случаях может приводить к столкновению МКА, вследствие возмущений углового движения БВ.

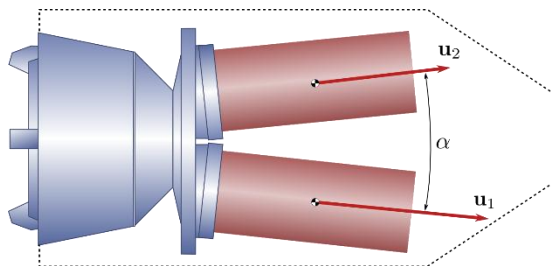


Рисунок 3 – Отделение МКА от БВ в одном направлении

Анализ и обеспечение безопасности процесса отделения нескольких МКА невозможен без использования адекватной математической модели процесса. Модель рассматриваемой системы может быть представлена в виде системы связанных твёрдых тел. Для записи уравнений её движения можно использовать классические уравнения движения центра масс каждого МКА и БВ и динамические уравнения Эйлера [5,7], решаемые совместно с кинематическими уравнениями, записанными в углах Брайнта [8]. Учитывая небольшую продолжительность процесса отделения: этапа работы толкателей и близкого относительного движения МКА и БВ, на котором необходимо контролировать безударность относительного движения МКА, достаточно учесть влияние только сил толкателей и усилий расстыковки разъёмных соединений, соединяющих МКА с БВ.

При построении математической модели должны быть учтены все этапы относительного движения МКА и БВ, которые оказывают существенное влияние на безударность «ближнего» относительного движение. Это этап движения под действием сил толкателей и сил расстыковки разъёмных соединений по направляющим шпилькам, устанавливаемым в поперечном стыке МКА и БВ; этап свободного относительного движения под действием толкателей и этап свободного относительного движения на котором должны контролироваться расстояния между конструкциями отделяемых МКА и БВ.

Использование рассматриваемой схемы отделения МКА (рис. 3) предъявляет жесткие требования к точности работы средств отделения МКА. При использовании традиционных средств отделения – пружинных толкателей, в процессе их изготовления неизбежны вариации их параметров: начальных усилий, хода и жёсткости пружин. Эти возможные отклонения могут привести к существенным возмущениям углового движения отделяемых МКА и их столкновению. Отметим также, что на этапе проектирования системы отделения инерционно-массовые характеристики МКА также известны с некоторой погрешностью. В частности, отклонение положения центра масс МКА может привести к возникновению момента главного вектора сил толкателей относительно центра масс МКА, что также приведет к возмущению его угловой скорости. Так, например, отделение МКА «Аист-1» выполнялось при помощи четырёх пружинных толкателей с суммарной работой 12 Дж. Максимальное отклонение положения центра масс относительно продольной оси МКА не превышало 6,5 мм. Максимальное отклонение начального усилия толкателя от среднего значения не превышало 10%. Математическое моделирование процесса отделения МКА в статистической постановке с учетом возможных отклонений параметров системы от средних значений показало, что поперечная угловая скорость МКА может лежать в интервале от 0 до 7 градусов в секунду при среднем значении около 2,7 градуса в секунду. Угловая скорость запущенных в 2013 и 2014 годах МКА «Аист-1» составила 3,5 и 4 градуса в секунду соответственно. Для уменьшения возмущений угловой скорости МКА может использоваться селекция пружин толкателей с близкими характеристиками, а также настройка параметров толкателей для компенсации измеренных отклонений положения центра масс МКА.

Следует также отметить, что отделение МКА по схеме представленной на рис. 3, потребует позднего раскрытия подвижных элементов конструкции МКА: солнечных батарей, антенн. Обычно подвижные элементы конструкции открываются сразу после отделения КА от БВ.

Таким образом, безопасное групповое выведение малых КА требует детального анализа динамики относительного движения МКА и БВ, как на этапе работы средств отделения так и на «дальнем» орбитальном этапе движения. Особое внимание следует уделять обеспечению точности работы средств отделения и реализации заданной циклограммы работы средств отделения. Для решения этих задач необходима разработка адекватной математической модели процесса.

*Список литературы*

1. Nishida S.-I. et al. Space debris removal system using a small satellite // Acta Astronaut. 2009. Vol. 65, № 1. P. 95–102.
2. Аваряский Д.П., Белоконов И.В. Исследование проблемы безопасного полёта наноспутников при их выведении на низкие орбиты // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5 (66). P. 13–18.
3. Schaub H., Junkins J. Analytical mechanics of space systems. 2nd ed. AIAA, 2003. P. 794.
4. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. Наука, 1972.
5. Круглов Г.Е. Аналитическое проектирование механических систем. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2001. P. 131.
6. Carruccio G. Nanosatellite Launch Adapter System (NLAS) [Online]. Brian Dunbar, 2013. URL: <http://www.nasa.gov/centers/ames/engineering/projects/nlas.html> (accessed: 02.08.2014).
7. Юдинцев В.В. Отделение космического аппарата от орбитальной ступени [Online]. 2013. URL: [http://www.slideshare.net/tm\\_ssau/pusher-17057954](http://www.slideshare.net/tm_ssau/pusher-17057954).
8. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М.: Мир, 1980.