

01, январь 2016

УДК 621.45.072.6

Реализация корректирующего импульса на КА с использованием реактивных двигателей малой тяги

Тимашикова А.М., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»*

*Научные руководители: Фомичев А.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»*

a.v.fomichev@bmstu.ru

*Федотов В.П., начальник расчетно-теоретического отдела
Россия, 125040, г. Химки, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»*

fed_vp@laspace.ru

Изменение траектории движения КА является одной из важнейших задач системы управления КА. Как правило, такое изменение называют коррекцией траектории. Сама коррекция траектории заключается в том, что путем включения двигательной установки изменяют скорость движения центра масс КА, что приводит соответственно к изменению параметров его орбитального движения. При этом величина импульса скорости может составлять от 5 до 30 м/с для совмещения орбиты КА с номинальной траекторией, требуемой для выполнения задач КА либо может достигать от 500 до 2000 м/с для перехода на другие орбиты или перехода на трассу перелета от Земли на другие планеты.

Обеспечение выполнения задач системы управления движением центра масс КА производится как на Земле, так и на самом КА. Так, для осуществления коррекции траектории необходим ввод в БКУ полетного задания (ПЗ) в одном из сеансов связи с КА. В ПЗ БКУ задаются необходимые исходные данные, которые определяют параметры проведения коррекции и функционирования бортовой аппаратуры. В соответствии с заложенным ПЗ в БКУ на фоне режима инерциальной ориентации выполняются подготовительные операции перед переходом КА в режим выдачи корректирующего импульса (ВКИ).

Режим ВКИ включает в себя:

- переориентацию связанных осей КА в положение, соответствующее требуемому направлению выдачи импульса изменения линейной скорости КА для изменения параметров орбиты;
- стабилизацию КА в этом положении;
- управление движением центра масс и вокруг центра масс КА при работающих двигателях коррекции;
- определение момента выключения двигателей коррекции;
- успокоение КА после выключения двигателей коррекции;
- переориентации КА в исходное или новое положение.

Управление ориентацией и скоростью коррекции КА включает в себя определение требуемого значения скорости коррекции, измерение параметров для поддержания ориентации, содержащих угловую скорость. При этом для выработки сигналов управления, направленных на поддержание ориентации, используются измеренные параметры, включающие информацию с датчиков внешней ориентации и датчиков угловой скорости КА.

Для поддержания ориентации связанных осей КА в заданном положении инерциального пространства применяют реактивные двигатели малой тяги. Перед непосредственным процессом выдачи импульса изменения линейной скорости, или корректирующего импульса, необходимо осуществить переориентацию и стабилизацию углового положения КА. Для чего сигналы по каждому каналу стабилизации, получаемые от измерительных приборов, формируются как сумма углового рассогласования текущей ориентации КА от программного положения, отклонения фильтрованной угловой скорости КА от заданной скорости вращения и интегральной составляющей от углового рассогласования с соответствующими весовыми коэффициентами.

$$\sigma_x = \left(k_{\varphi 0} \cdot \varphi + k_{\varphi 1} \cdot (\omega_{x1} - \omega_{x2} + \Delta \omega_x) + k_{\varphi 2} \cdot \int \varphi dt \right) \cdot W_x,$$

$$\sigma_y = \left(k_{\psi 0} \cdot \psi + k_{\psi 1} \cdot (\omega_{y1} - \omega_{y2} + \Delta \omega_y) + k_{\psi 2} \cdot \int \psi dt \right) \cdot W_y,$$

$$\sigma_z = \left(k_{\nu 0} \cdot \nu + k_{\nu 1} \cdot (\omega_{z1} - \omega_{z2} + \Delta \omega_z) + k_{\nu 2} \cdot \int \nu dt \right) \cdot W_z,$$

где $k_{\varphi 0}$, $k_{\varphi 1}$, $k_{\psi 0}$, $k_{\psi 1}$, $k_{\nu 0}$, $k_{\nu 1}$, $k_{\varphi 2}$, $k_{\psi 2}$, $k_{\nu 2}$ – коэффициенты усиления по соответствующим сигналам управления;

φ , ψ , ν – угловые рассогласования;

$\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ – фильтрованные значения проекции угловой скорости вращения объекта на связанные оси;

$\omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{z2}$ – проекции заданной угловой скорости вращения объекта на связанные оси в режиме переориентации,

$\Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ – расчетные значения приращений проекций угловой скорости КА за счет работы ДС, ДК.

W_x, W_y, W_z – передаточные функции корректирующих фильтров в каналах X, Y, Z вида:

$$W(z) = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - e^{-pTN}}{1 - e^{-pT}},$$

где T – период дискретизации, N – количество точек осреднения.

Рассчитанные значения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ сравниваются по модулю с зоной нечувствительности, величина которой определяется заданной точностью стабилизации. При превышении уровня сигналов $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ зоны нечувствительности формируются команды на включение/отключение ДС/ДК.

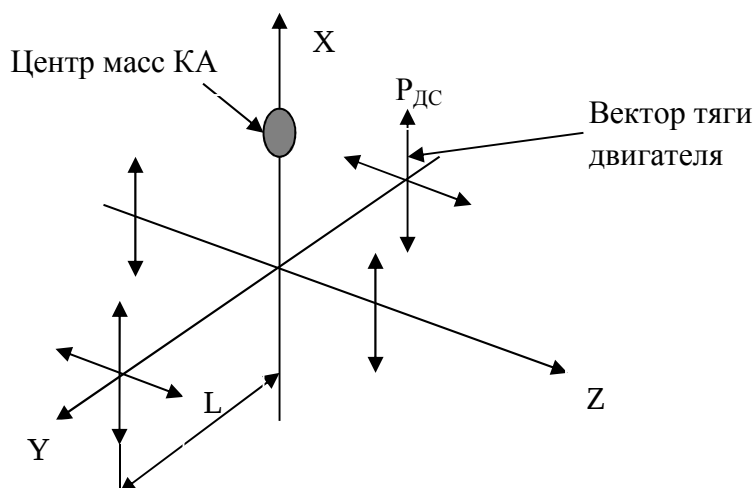
После стабилизации КА в положении, соответствующем требуемому направлению, становится возможна реализация выдачи импульса изменения скорости КА для коррекции параметров орбиты. Изменение траектории полета КА осуществляется за счет работы маршевого двигателя, который создает ускорение движения центра масс порядка $1 \dots 5 \text{ м/с}^2$. Как правило, такие двигатели устанавливаются на двухосном поворотном приводе или в двухкоординатном механизме поперечного перемещения относительно корпуса КА. Технологически невозможно установить двигатель так, чтобы вектор его тяги проходил через точку центра масс КА, поэтому маршевый двигатель является источником значительного возмущающего момента, который равен произведению тяги двигателя коррекции (P_K) на расстояние (ϵ) от вектора тяги до точки центра масс, или эксцентриситет тяги

$$M = \epsilon \cdot P_{DK}.$$

Для уменьшения возмущающего момента величину эксцентриситета тяги технологическими средствами стремятся снизить до минимально возможных значений. Тем не менее, его величина для не заправленного топливом КА может составлять 3 мм и более. По мере выгорания топлива из нескольких баков, расположенных в одной поперечной плоскости, за счет неоднородности выработки топлива из баков его величина растет и может достигать максимальных значений до 15 ... 30 мм. Привод или механизм перемещения позволяют не только совместить вектор тяги МД и центр масс, компенсируя

возмущающий момент, но и использовать тягу маршевого двигателя для создания управляющих моментов и управления тем самым угловым движением КА.

Для создания импульсов коррекции траектории используются как сами двигатели стабилизации, так и реактивные двигатели коррекции сравнительно небольшой тяги, создававшие ускорение перемещения центра масс порядка $0,01 \dots 0,1 \text{ м/с}^2$. При использовании нерегулируемых двигателей коррекции на КА может действовать постоянный возмущающий момент, тогда и работа ДС будет заключаться в компенсации этого момента. При управлении угловым движением ДС должны создавать управляющий момент за счет одновременного включения пары двигателей, вектор тяги которых проходит на фиксированном расстоянии от центра масс. Для управления движением вокруг трех связанных осей необходимо располагать тремя парами ДС, создающими положительные управляющие моменты вокруг соответствующих осей, и тремя парами ДС, создающими отрицательные моменты. Схема расположения двигателей стабилизации на КА представлена на рисунке.



Создание управляющего момента осуществляется путем открытия электромагнитного клапана соответствующего сопла. При открытии клапана в камеру сгорания поступает топливо, которое воспламеняется и продукты его сгорания устремляются в сопло, создавая тем самым тягу двигателя $P_{ДС}$. Закрытие клапана приводит к прекращению истечения продуктов сгорания. А так как вектор тяги не проходит через центр масс, а находится на расстоянии L от него, то тем самым на КА действует управляющий момент

$$M_y = P_{ДС} \cdot L.$$

При включении двух двигателей с противоположным направлением их тяги на КА действует пара сил с удвоенным управляющим моментом и практически нулевой вектор силы. Достаточно малая тяга одного ДС вызывает незначительные искажения траектории и поэтому для снижения массы конструкции КА, зачастую в каналах управления углами тангажа и рыскания используют только по два ДС, один из которых создает положительный управляющий момент, а другой – отрицательный. Управляющий момент ДС в каналах тангажа и рыскания должен в $\xi=1,5 \dots 2$ раза превышать возмущающий момент. То есть тяга ДС должна быть не менее

$$P_{ДС} \geq \frac{\xi P_{ДК} \varepsilon}{L}.$$

Если $\varepsilon=0,075$ м, $\xi=2$ и $L=1,5$ м, то тяга каждого из ДС должна составлять порядка 10% от тяги двигателя коррекции и их импульс составит от 5 до 7% в общем импульсе коррекции. Если же используется несколько двигателей коррекции, например, 4, установленных на расстоянии l от центра масс, то может возникать дополнительный возмущающий момент от разности тяг двигателей стабилизации

$$\Delta M_{ДК} = \Delta P_{ДК} l \sqrt{2},$$

где $\Delta P_{ДК}$ – допуск на тягу ДК.

С учетом этого дополнительного момента тяга ДС должна быть не менее

$$P_{ДС} \geq \frac{\xi (4 P_{ДК} \varepsilon + \Delta P_{ДК} l \sqrt{2})}{L}.$$

Если $\xi=2$, $\varepsilon=0,1$ м, допуск на тягу ДК составляет 15%, ДК установлены на расстоянии 0,3 м от центра масс, а ДС – на расстоянии 1,5 м, то тяга ДС должна составлять порядка 22 % от тяги каждого ДК, а их вклад в 11 до 15% от общего импульса коррекции. Время непрерывной работы ДК, то есть отработки корректирующего импульса, задается в ПЗ.

Возможно также использование двигателей стабилизации в качестве двигателей коррекции, что предполагает их непрерывное включение на время длительности коррекции, а управление угловым движением следует выполнять путем импульсного отключения одного из ДС в канале тангажа и рыскания. При таком способе управления можно допустить более существенный эксцентриситет суммарной тяги ДС. Допустимое значение эксцентриситета тяги каждого ДС должно быть не более

$$\varepsilon \leq 0,25 L \left(\frac{1}{\xi} - \frac{\sqrt{2} \Delta P_{ДС}}{P_{ДС}} \right).$$

Если $\xi=2$, допуск на тягу ДС составляет 15%, а $L=1,5\text{м}$, то максимальный эксцентриситет тяги ДС не должен превышать 0,18 м.

В ходе отработки штатного импульса коррекции БКУ рассчитывает длительность работы каждого ДК с учетом пауз в их работе для парирования возмущений по следующему соотношению:

$$\tau_{vi}^* = \tau_{vi} + K \cdot \tau_{pi},$$

где τ_{vi}^* – время эффективной работы каждого ДК;

τ_{vi} – суммарное время работы каждого ДК;

τ_{pi} – суммарное время пауз между включениями;

K – коэффициент, учитывающий фронты нарастания тяги при включении и спада тяги после выключения ДК с начальным значением равным нулю (настраиваемый параметр).

На завершающем участке режима ВКИ происходит успокоение КА на ДС после окончания работы ДК. Угловая стабилизация как до, так и после работы ДК осуществляется на ДС. Стабилизация КА на участке выдачи импульса коррекции относительно связанных осей ОУ и ОZ КА производится отключением соответствующих ДК, а относительно оси ОХ – работой ДС.

Выключение ДК производится при выполнении соотношения:

$$\sum_{i=1}^m \tau_{vi}^* \geq m \cdot \tau_{имп},$$

где $\tau_{имп}$ – длительность импульса коррекции (уставка ПЗ),

m – количество работающих ДК.

Для выключения ДК по окончании отработки корректирующего импульса БКУ выдает команды на закрытие электроклапанов всех работающих ДК. После выключения ДК производится успокоение КА с помощью ДС для минимизации угловых скоростей КА.

Для обеспечения устойчивости управления движением длительность временных интервалов от момента получения измерительной информации до выдачи команд управления на исполнительные органы не должна превышать некоторых пределов. Поэтому получение измерительной информации должно производиться в начале цикла управления, а формирование команд управления – в конце цикла преобразования этой информации. Выдача команд управления на исполнительные органы допускается в начале следующего цикла работы режима. Таким образом, интервал времени между моментом получения информации измерительным прибором и выдачей физической команды управления на исполнительный орган не должна превышать длительности 1-2 циклов. Так, длительность цикла для режима ВКИ составляет от 0,03 до 0,05 с.

Рассмотренный режим характерен тем, что обеспечивает приведение КА в положение, соответствующее требуемому направлению выдачи корректирующего импульса, с помощью ДС, саму коррекцию траектории движения с помощью ДК, а затем успокоение и переориентацию КА в требуемое положение при оптимальных затратах рабочего тела КА.

Список литературы

- [1] Основы теории полета космических аппаратов / под ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.
- [2] Казаковцев В.П. Теория космического полета. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 16 с.
- [3] Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. Пассивные и комбинированные системы. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
- [4] Корянов В.В., Казаковцев В.П. Основы теории космического полета. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 62 с.
- [5] Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебное пособие / под ред. А.С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 302 с.
- [6] Козлов А.А., Воробьев А.Г., Боровик И.Н. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги. М.: Изд-во МАИ, 2013. 208 с.
- [7] Протопопов А. П., Богачев А. В., Воробьева Е. А. Коррекция орбиты космического аппарата на высокоэллиптической орбите двигателями малой тяги // Труды МАИ. Электрон. журн. 2013. № 68. Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41750> (дата обращения 03.09.2013).
- [8] Ходненко В.П., Хромов А.В. Корректирующие двигательные установки для малого космического аппарата // Труды НПП ВНИИЭМ. 2009. № 8. С. 27-32.
- [9] Агеенко Ю.И., И.Г. Панин, И.В. Пегин, И.А. Смирнов Основные достижения в ракетных двигателях малой тяги // Двигатель. 2014. № 2. С. 24-27.
- [10] Давыдов А.А., Игнатов А.И., Сазонов В.В. Применение реактивных двигателей для управления поступательным движением КА одновременно с разгрузкой кинетического момента электромеханических исполнительных органов // Препринт ИПМ. Электрон. журн. 2006. № 85. Режим доступа: http://keldysh.ru/papers/2006/prep82/prep2006_82.html (дата обращения 03.09.2013).