

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАНЕВРОВ ПЕРСПЕКТИВНОГО КА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАР ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**В.Н. Платонов**

*ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»*  
Россия, 141070, Московская область, Королёв, ул. Ленина, 4а  
E-mail:valery.platonov@rsce.ru

**Р.С. Хетагов**

*ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»*  
Россия, 141070, Московская область, Королёв, ул. Ленина, 4а  
E-mail:rashid.khetagov@rsce.ru

**Ключевые слова:** коррекция орбиты, электрореактивный двигатель, маховики, кинетический момент, орбитальная система координат.

**Аннотация:** Рассматривается проведение маневров перспективного геостационарного КА с использованием системы из восьми электрореактивных двигателей, обеспечивающих одновременное управление движением центра масс и вокруг центра масс. Разработан алгоритм, минимизирующий количество включений электрореактивных двигателей. Проведено моделирование, подтвердившее эффективность работы алгоритма.

## 1. Введение

Коррекции орбиты перспективного геостационарного КА в трансверсальном и боковом направлениях проводятся с использованием восьми электрореактивных двигателей (ЭРД) тягой 4 Г каждый. ЭРД имеют ограничения по количеству включений (до 5000) и ресурсу работы (2000-2500 часов). ЭРД расположены по схеме обеспечивающей одновременное создание сил и моментов относительно центра масс КА. Стабилизация при проведении маневров осуществляется системой из 4-х маховиков с максимальным кинетическим моментом каждого маховика равным 18 Нмс, расположенных по схеме «октаэдр». Область вариации кинетического момента такой системы маховиков близка к шару с радиусом 29 Нмс.

Подобная схема размещения ЭРД использовалась на геостационарных КА серии «Ямал». Алгоритм расчета последовательности включений ЭРД при проведении маневров приведен в [1-4]. Алгоритм обладает универсальностью, в частности, позволяет проводить одновременно коррекцию орбиты в боковом и трансверсальном направлениях.

Далее в тексте наряду с ЭРД используется название тяговый модуль (ТМ).

Во время штатной работы КА серии «Ямал» из-за ограничений по энергопотреблению допускалась одновременная работа только одного ТМ. Для рассматриваемого перспективного КА при проведении маневров возможна одновременная работа двух ТМ.

## 2. Схема расположения ЭРД, управляющие силы и моменты

Для пояснения схемы расположения ТМ введем следующие системы координат с началом в центре масс КА:

- орбитальную систему координат  $0X_0Y_0Z_0$  (ось  $0X_0$  по направлению центр масс КА – центр Земли, ось  $0Z_0$  противоположна вектору орбитальной угловой скорости КА, ось  $0Y_0$  находится в плоскости орбиты и образует острый угол с направлением вектора линейной скорости КА);
- связанную систему координат  $0XYZ$ , направления осей которой определены в конструкторской документации КА.

При поддержании орбитальной ориентации оси связанной системы координат  $0XYZ$  совпадают с соответствующими осями орбитальной системы координат  $0X_0Y_0Z_0$ .

Восемь ТМ разбиты на два пояса по четыре двигателя в каждом. В одном поясе находятся ТМ1, ТМ3, ТМ5, ТМ7, в другом ТМ2, ТМ4, ТМ6, ТМ8. Пояса двигателей находятся в плоскостях параллельных плоскости  $OYZ$  и расположены по разные стороны от центра масс. Используется размещение ТМ из работы [5].

Схема размещения восьми ТМ представлена на рис. 1.

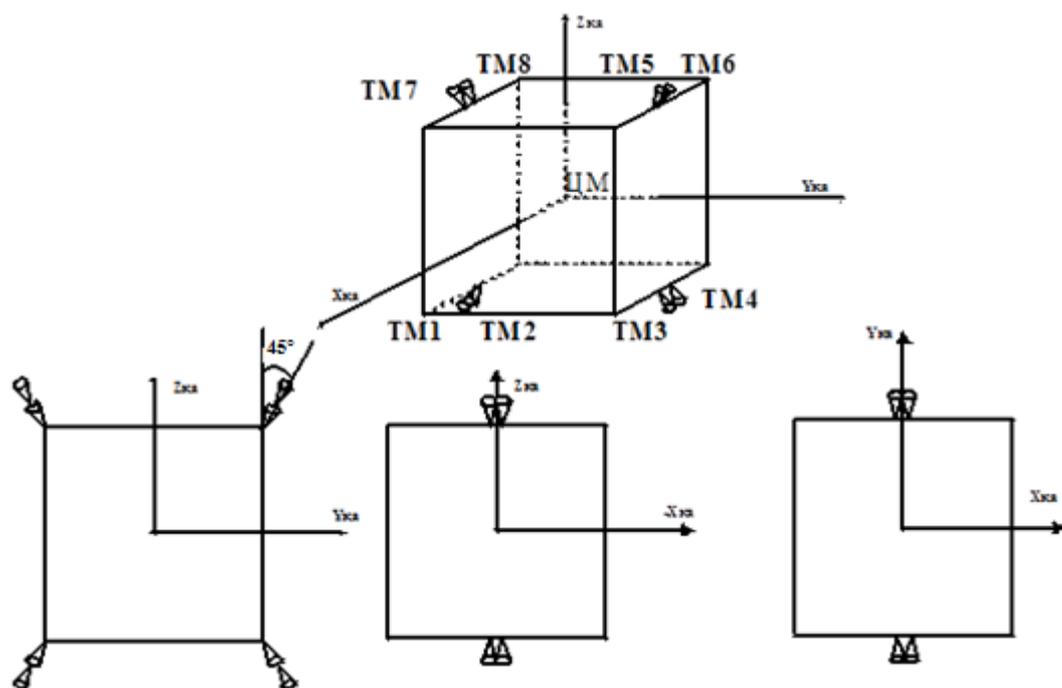


Рис 1. Схема размещения восьми ЭРД (ТМ).

ТМ разбиты на две группы по четыре двигателя в каждой. В одной группе находятся ТМ1, ТМ2, ТМ3, ТМ4, в другой ТМ5, ТМ6, ТМ7, ТМ8. Существуют ограничения на возможные включения пар двигателей.

Силы и моменты, создаваемые каждым из восьми двигателей, а также допустимыми парами ТМ используемыми для проведения маневров при величине тяги каждого двигателя равной 4 Г и при отсутствии перекосов векторов тяг относительно номинальных значений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Силы и моменты тяговых модулей.

	$F_y, Н$	$F_z, Н$	$M_x, Нм$	$M_y, Нм$	$M_z, Нм$
ТМ1	$P_1$	$P_2$	$M_1$	$-M_2$	$M_3$

ТМ2	$P_1$	$P_2$	$M_1$	$M_2$	$-M_3$
ТМ3	$-P_1$	$P_2$	$-M_1$	$-M_2$	$-M_3$
ТМ4	$-P_1$	$P_2$	$-M_1$	$M_2$	$M_3$
ТМ5	$-P_1$	$-P_2$	$M_1$	$M_2$	$-M_3$
ТМ6	$-P_1$	$-P_2$	$M_1$	$-M_2$	$M_3$
ТМ7	$P_1$	$-P_2$	$-M_1$	$M_2$	$M_3$
ТМ8	$P_1$	$-P_2$	$-M_1$	$-M_2$	$-M_3$
ТМ1, ТМ4	0	$2P_2$	0	0	$2M_3$
ТМ2, ТМ3	0	$2P_2$	0	0	$-2M_3$
ТМ3, ТМ6	$-2P_1$	0	0	$-2M_2$	0
ТМ4, ТМ5	$-2P_1$	0	0	$2M_2$	0
ТМ5, ТМ8	0	$-2P_2$	0	0	$-2M_3$
ТМ6, ТМ7	0	$-2P_2$	0	0	$2M_3$
ТМ7, ТМ2	$2P_1$	0	0	$2M_2$	0
ТМ8, ТМ1	$2P_1$	0	0	$-2M_2$	0

*Примечание:*  $P_1, P_2$  – модули проекций тяги на оси  $OY, OZ$  соответственно,  $M_1, M_2, M_3$  – модули проекций моментов на оси  $OX, OY, OZ$  создаваемых каждым ТМ соответственно. Данные величины равны:  $P_1 = 0,0277\text{Н}$ ,  $P_2 = 0,0277\text{Н}$ ,  $M_1 = 0,00392\text{ Нм}$ ,  $M_2 = 0,00277\text{ Нм}$ ,  $M_3 = 0,00277\text{ Нм}$ .

### 3. Алгоритм расчета включений ТМ при проведении маневров

Длительность коррекций орбиты по наклонению составляет примерно 4 часа. При этом коррекции могут проводиться один раз в 2 дня или сериями по две коррекции в сутки с перерывами между сериями. Длительность коррекций орбиты по трансверсали не превышает одного часа, частота 1-2 раза в месяц.

В работе [4] рассмотрен универсальный алгоритм расчета включений ТМ. Приведенный алгоритм может применяться при проведении коррекций орбиты как в боковом, так и в трансверсальном направлениях. В среднем коррекции орбиты проводятся пятью включениями ТМ. С точки зрения экономии количества включений и равномерности выработки ресурсов каждого из ТМ целесообразно реализовывать коррекцию орбиты по наклонению четырьмя включениями разных двигателей.

Рассмотрим коррекции орбиты по наклонению. Пусть, например, требуется провести коррекцию орбиты, с величиной приращения скорости  $+\Delta V_z$  при ориентации КА в орбитальной системе координат. Пусть проекция накопленного кинетического момента  $H_{z0}$  по оси  $z$  положительна. Тогда маневр можно совершить последовательным включением пар: сначала пары ТМ2+ТМ3, затем пары ТМ1+ТМ4. Если ускорения и моменты всех двигателей равны номинальным, то половину времени маневра работает пара ТМ2+ТМ3, другую половину пара ТМ1+ТМ4. По окончанию маневра суммарный кинетический момент маховиков по оси  $z$  возвратится к значению  $H_{z0}$ . По опыту полета КА серии «Ямал» ускорения КА при работе разных ТМ отличаются на 1-3%, а моменты до 20-25%. Поэтому, чтобы суммарный кинетический момент после коррекции орбиты не изменился надо включать все ТМ на разное время. Если в начальный момент времени  $H_{z0}$  имеет отрицательное значение, то сначала включается пара ТМ1+ТМ4, затем пара ТМ2+ТМ3.

Запишем уравнения изменения импульса и изменения кинетического момента КА для случая проведения маневра в орбитальной системе координат. При этом изменение кинетического момента ИИО спроектируем в инерциальную систему координат  $Ox_1y_1z_1$

совпадающую с орбитальной в момент начала коррекции орбиты. Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 & a_1 \Delta t_1 + a_2 \Delta t_2 + a_3 \Delta t_3 + a_4 \Delta t_4 = \Delta V_z, \\
 & a_1 \Delta t_1 + a_2 \Delta t_2 - a_3 \Delta t_3 - a_4 \Delta t_4 = 0, \\
 (1) \quad & M_{1x} \Delta t_1 + M_{2x} \Delta t_2 - M_{3x} \Delta t_3 - M_{4x} \Delta t_4 = \Delta H_x, \\
 & -M_{1y} \Delta t_1 + M_{2y} \Delta t_2 - M_{3y} \Delta t_3 + M_{4y} \Delta t_4 = \Delta H_y, \\
 & M_{1z} \Delta t_1 - M_{2z} \Delta t_2 - M_{3z} \Delta t_3 + M_{4z} \Delta t_4 = \Delta H_z;
 \end{aligned}$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – модули проекций ускорений на оси  $y, z$ , соответственно при работе ТМ1, ТМ2, ТМ3, ТМ4,  $\Delta H_x, \Delta H_y, \Delta H_z$  – требуемое изменения накопленного кинетического момента в инерциальной системе координат  $Ox_1y_1z_1$ ,  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$  – длительности включений соответственно ТМ1, ТМ2, ТМ3, ТМ4,  $M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) – модули проекций управляющего момента ТМ на оси инерциальной системы координат, соответствующие серединам интервалов включений ТМ.

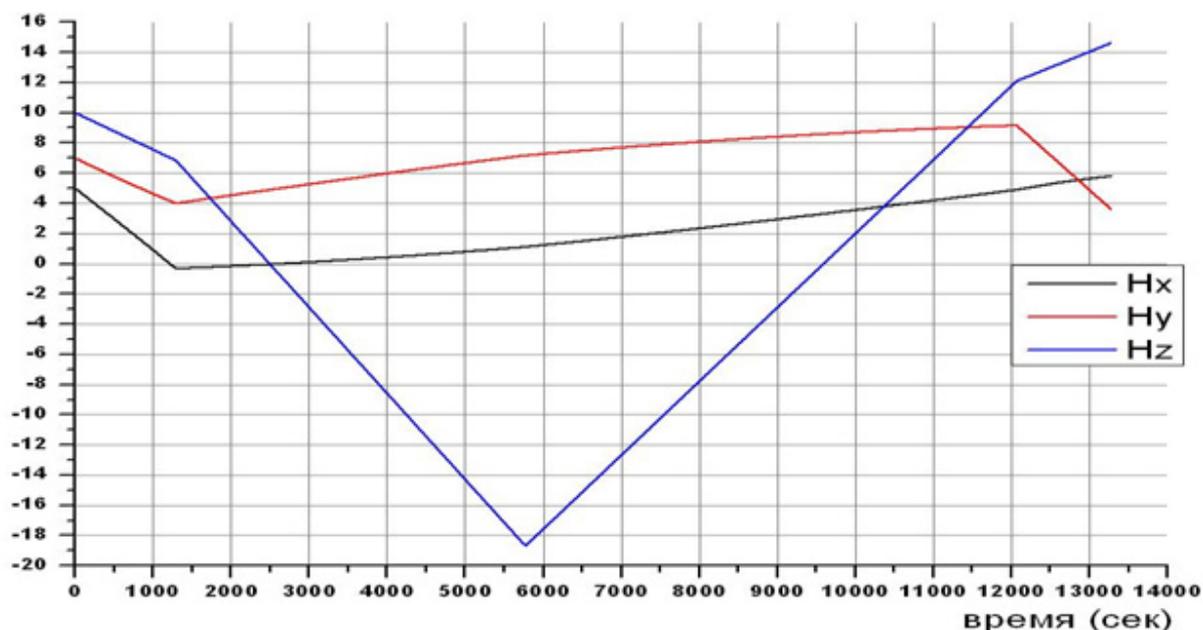
Расчет коррекции орбиты проводится в три этапа. На первом этапе, осуществляется расчет требуемого приращения  $\Delta H_z$ . Пусть  $H_{z0}$  положительна. Тогда сначала работает пара ТМ2+ТМ3, а затем пара ТМ1+ТМ4. В первом приближении полагаем  $\Delta t_2 = \Delta t_3$ ,  $\Delta H_z = 0$ . Решая, при данных условиях, совместно 1, 2 и 5 уравнения (1), находим  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ . Определяем значение  $H_{zK}$  по окончании работы пары ТМ2+ТМ3. Если  $H_{zK}$  не превышает допустимую величину  $R_D$ , то  $\Delta H_z$  остается равной нулю. Иначе  $\Delta H_z = |H_{zK}| - R_D$ . Далее решаются уравнения 1, 2, 5 и находятся  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ . Для найденных  $\Delta t_i$  ( $i=1-4$ ), в инерциальной системе координат  $Ox_1y_1z_1$  определяются  $M_{yi}$  соответствующие серединам интервалов работы ТМ в ОСК.

На втором этапе, решая систему из первого, второго, четвертого и пятого уравнений из (1) для случая проведения коррекции орбиты в ИСК, совпадающей с ОСК на момент начала маневра, определяются расчетные длительности включения каждого из ТМ 1, 2, 3, 4. При этом в четвертом уравнении из (1), используются проекции моментов ТМ на ось  $Y$  в ИСК,  $\Delta H_y$  полагается равной нулю. Пусть  $\Delta t_2 > \Delta t_3$ , а  $\Delta t_1 > \Delta t_4$ . Тогда продолжительность маневра составляет  $\Delta t_2 + \Delta t_1$ . Двигатель ТМ3 может включаться одновременно с двигателем ТМ2, а выключаться раньше двигателя ТМ2, или может включать через время  $\Delta t_2 - \Delta t_3$  после включения двигателя ТМ2 и выключаться одновременно с двигателем ТМ2. Из двух вариантов выбирается тот, в котором суммарный кинетический момент маховиков в плоскости  $Oxy$  уменьшается по результатам включений двигателей ТМ2, ТМ3. Выбор варианта осуществляется следующим образом. Рассчитывается косинус угла (обозначаемый  $\cos \varphi_1$ ) между проекцией момента ТМ2 на плоскость  $Oxy$  и накопленным кинетическим моментом в системе координат  $Ox_1y_1z_1$ . Затем накопленный кинетический момент перепроектируется в инерциальную систему координат  $Ox_2y_2z_2$ , отличающуюся от  $Ox_1y_1z_1$  поворотом вокруг оси  $Oz$  на угол  $\omega_0 \Delta t_2$  по часовой стрелке и рассчитывается косинус угла между проекцией момента ТМ2 на плоскость  $Oxy$  и накопленным кинетическим моментом в системе координат  $Ox_2y_2z_2$  (обозначаемый  $\cos \varphi_2$ ). Если  $\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2$ , то двигатель ТМ3 включается одновременно с двигателем ТМ2. В противном случае двигатель ТМ3 включается через время  $\Delta t_2 - \Delta t_3$  после включения двигателя ТМ2. Подобным образом определяется и момент включения двигателя ТМ4 (одновременно с ТМ1 или через время  $\Delta t_1 - \Delta t_4$  после включения ТМ1). Таким образом, по результатам расчетов определяются последовательность включений ТМ, времена начала включений и продолжительности включений каждого ТМ.

На третьем этапе проводятся расчеты подобные расчетам второго этапа, для двух допустимых значений  $\Delta H_y$ , равных  $\Delta H_{yD}$  и минус  $\Delta H_{yD}$ . Выбирается вариант с

наименьшей по модулю величиной проекции кинетического момента на плоскость орбиты по окончанию коррекции (из трех вариантов расчетов с  $\Delta H_Y=0$ ,  $\Delta H_Y=\Delta H_{YD}$ ,  $\Delta H_Y=-\Delta H_{YD}$ ).

Проводилось моделирование коррекции орбиты по наклонению. Использовались ускорения и моменты создаваемые ТМ с разбросами по ускорениям и моментам имевшимися при полетах КА серии «Ямал». На рис. 2 приведено изменение кинетического момента системы маховиков при проведении коррекции наклонения с использованием ТМ1-ТМ4. Сначала включается ТМ3, через 1300 секунд подключается ТМ2, работа пары двигателей продолжается 4480 секунд, затем ТМ2 и ТМ3 выключаются, включается пара двигателей ТМ1+ТМ4, двигатель ТМ4 отключается за 1220 секунд до окончания маневра.



**Рис. 2.** График изменения кинетического момента системы маховиков при проведении коррекции орбиты по наклонению с использованием ТМ1-ТМ4 (Нмс).

Результаты статистических расчетов показывают, что относительная продолжительность парной работы (отношение  $\Delta V$  отработанного парой ЭРД к заданному  $\Delta V$ ) составляет 80%.

## 4. Заключение

Разработан алгоритм расчета последовательностей включений электрореактивных двигателей и пар ЭРД, позволяющий экономить ресурс работы ЭРД по количеству включений и обеспечивать равномерную выработку ресурсов отдельных двигателей по числу включений и суммарной длительности работы. Проведено математическое моделирование подтвердившее эффективность работы алгоритма. Относительная продолжительность парной работы составляет 80%.

## Список литературы

1. Платонов В.Н. Управление кинетическим моментом при проведении маневров КА «Ямал-100» с использованием электрореактивных двигателей // Труды РКТ. 2002. Серия XII, Вып. 1. С. 92-97.

2. Бранец В.Н., Ковтун В.С., Платонов В.Н., Шестаков А.В. Патент RU 2112716 С1. МКИ В64 G 1/26, 1/28. Способ управления космическим аппаратом с помощью реактивных исполнительных органов и система для его реализации // Изобретения. 1998. № 16.
3. Бранец В.Н., Земсков Е.Ф., Ковтун В.С., Платонов В.Н., Шестаков А.В. Патент RU 2124461 С1. МКИ В64 G 1/26, 1/24, 1/40. Способ управления космическим аппаратом, снабженным реактивными двигателями с направленными под углом к осям связанного базиса и смещенными относительно центра масс аппарата линиями действия тяг, система для реализации способа, блок реактивных двигателей системы // Изобретения. 1999. № 1.
4. Платонов В.Н. Одновременное управление движением центра масс и вокруг центра масс при маневрах космических аппаратов на геостационарной и высокоэллиптических орбитах с использованием электрореактивных двигателей // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 56-65.
5. Платонов В.Н., Протопопов А.П. Расчет последовательности включений электрореактивных двигателей при проведении маневров КА.9-я Российская мультиконференция по проблемам управления // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2016). Санкт-Петербург, 2016. С. 401-407.