

УДК 629.78

ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕЛЕТА В СИСТЕМУ ЮПИТЕРА

© Давыдов Р.С., Старинова О.Л.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

e-mail: dawrom7@yandex.ru

В настоящее время при разработке космических программ происходит смещение акцента в сторону более широкого использования электроракетных двигателей (ЭРД) в качестве маршевых двигателей для перспективных космических аппаратов (КА). Особенно актуальным использование ЭРД становится для космических программ, требующих длительных энергоемких перелетов, значительных приращений характеристической скорости и отработки больших суммарных импульсов тяги. Использование ЭРД в составе околоземных КА позволяет существенно увеличить массу выводимой полезной нагрузки и продлить срок активного существования. Особенно ярко основное преимущество электроракетных двигателей, связанное с их высоким удельным импульсом и, как следствие, низким расходом рабочего тела, проявляется при осуществлении межпланетных перелетов. В этом случае небольшая, но действующая на протяжении значительного времени тяга может обеспечить такую же длительность перелета как у КА с традиционными двигателями за счет сокращения длительности участков пассивного движения.

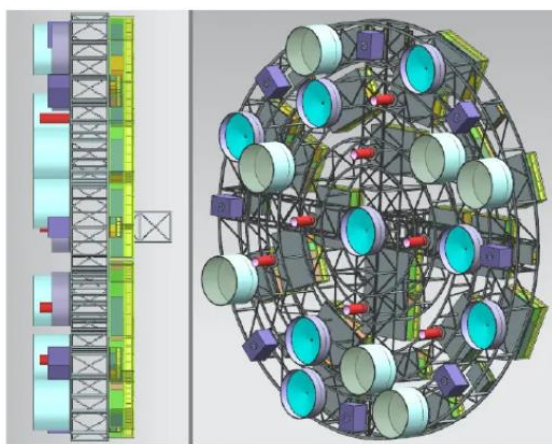


Рис. 1. Двигательная установка с размещенными ЭРД

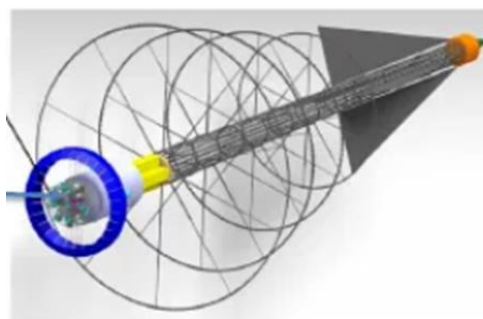


Рис. 2. Проектный облик КА для проекта «MARS – plus EUROPA»

Одним из перспективных международных проектов является исследовательский технологический проект INPPS (International Nuclear Power and Propulsion System), в котором используется ядерный источник энергии с ЭРД высокой мощности производства семи различных стран для осуществления миссии к Марсу с возвращением и последующим перелетом к спутнику Юпитера – Европе [1]. За последние годы в работе над этим проектом был достигнут значительный технологический прогресс – ядерный реактор, радиаторная и двигательная подсистемы флагмана INPPS успешно прошли частичные наземные испытания. На рис. 1, 2 показаны выбранная компоновка двигательной установки с ЭРД высокой мощности (HiPac и SX3 – Германия; IT-500 – Россия; NEO – Австрия) и общий вид КА.

КА для проекта «MARS – plus EUROPA» имеет большие габариты, и для его программных разворотов могли бы потребоваться большие затраты рабочего тела. Существенно проще, особенно с учетом использования большого количества двигателей, обеспечивается регулирование уровня ускорения. Поэтому предложено обеспечивать требуемое управление вектором тяги с помощью изменения его величины при минимальном изменении направления тяги.

При баллистической оптимизации миссии считалось, что величина тяги изменяется в диапазоне $P(t) \in [-P_{\max}, P_{\max}]$. Здесь P_{\max} является суммой тяг всех ЭРД, используемых в проекте. Таким образом, можно сформулировать следующую постановку задачи: требуется определить оптимальную траекторию перелета с точки зрения минимального расхода рабочего тела M_{PT} при фиксированной его длительности $T = \text{fixe}$ и выполнении требуемых граничных условий, соответствующих фазовым координатам планет в начальный \bar{X}_0 и конечный \bar{X}_K момент времени.

$$P_{opt}(t) = \arg \min_{P(t)} M_{PT}(\bar{X}_0, \bar{X}_K, T = \text{fixe})$$

В данной работе для получения оптимального программного управления на гелиоцентрическом участке траектории Земля – Марс использовался принцип максимума Понтрягина [2]. Получены оптимальные законы изменения суммарной тяги ЭРД, обеспечивающие минимальный расход рабочего тела. Приведена модификация полученных законов управления, учитывающая необходимость ступенчатой регуляции тяги, связанной с включением – выключением двигателей в заданной последовательности. В качестве начальных приближений для решения краевых задач оптимального управления использовались результаты, полученные в работе [3].

Моделирование гелиоцентрического движения осуществлялось с учетом эллиптичности и некомпланарности орбит планет в рамках ограниченной проблемы двух тел с использованием разработанного программного комплекса. Положение планет вычислялось с учетом стандартных эфемерид планет.

Библиографический список

1. Jansen F. [et al.]. MARS / Europa InPPS flagship high power space transportation // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. IAF, 2019. Т. 5. №. D2. 8, 9. С. x53118.
2. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. 4-е изд. М.: Наука., Глав. редакция физ-мат. литературы, 1983. 392 с.
3. Старинова О.Л. Расчет межпланетных перелетов космических аппаратов с малой тягой. 2-е изд. М. ЛЕЛАНД, 2020. 200 с.