УДК 629.78

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ РАСЧЕТА МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ ЗЕМЛЯ-МАРС С ДВИГАТЕЛЕМ МАЛОЙ ТЯГИ

О.В. Половинихина
Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Салмин
Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва

Цель данного исследования – разработка алгоритма, позволяющего моделировать межпланетный перелет Земля-Марс с двигателем малой тяги. Учитывается изменение траекторных характеристик космического аппарата (КА): полярные координаты r и φ, радиальная и трансверсальная составляющие скорости u и v; изменение времени перелета t, время работы двигателя t_m. В основе математической модели лежит метод Ньютона–Рафсона для решения краевых задач. Приняты допущения: рассматриваем перелет между круговыми компланарными орбитами; полагаем, что на КА кроме реактивных сил действует еще только сила притяжения Солнца. Входной параметр – запись, содержащая начальные траекторные характеристики КА, начальное реактивное ускорение a_0, скорость истечения газов c, а также нулевое приближение оптимизируемых параметров управления – угла между радиусом-вектором КА и вектором силы тяги λ, время переключения работы двигателя t. Движение КА описывается уравнениями в полярной системе координат:

$$\frac{dr}{dt}=u\,;\frac{d\varphi}{dt}=\frac{v}{r}\,;\frac{du}{dt}=\frac{v^2}{r}-\frac{1}{r^2}+\frac{a_0\delta}{\left(1-\frac{a_0}{c}t_m\right)}\cos\lambda\,;\frac{dv}{dt}=-\frac{u}{r}+\frac{a_0\delta}{\left(1-\frac{a_0}{c}t_m\right)}\sin\lambda\,;\frac{dt}{dt}=1\,;\frac{dt_m}{dt}=\delta\cdot$$

При этом $\lambda=\lambda_1,\ t\in[0,t_1]$; $\lambda=\lambda_2,\ t\in[t_2,t_k]$; $\lambda=0,\ t\in[t_1,t_2]$. Здесь t_k – конечное время полета КА, δ – функция переключения. На левом и правом концах задаются краевые условия.Алгоритм расчета содержит следующие основные этапы:

1. Задание входных данных.
2. Решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутта четвертого порядка с заданным нулевым приближением.
3. Вычисляется невязка и проверяется по критерию точности. Если она удовлетворяет заданному критерию, то переход к п.5, иначе, к п.4
4. Дробление шага метода Рунге – Кутта, переход к п.2.
5. Проверка невязки метода Ньютона – Рафсона по критерию точности. Если она удовлетворяет заданному критерию, то это означает, что найдены оптимальные параметры управления, переход к п. 12. Иначе переход к п.6.
6. Приращение оптимизируемых параметров на заданную фиксированную величину.
7. Решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутта четвертого порядка с приращенными оптимизируемыми параметрами.
8. Формирование и решение методом Крамера СЛАУ, позволяющей найти искомые неизвестные приращения для метода Ньютона – Рафсона.
9. Нахождение оптимизируемых параметров на следующей итерации.
10. Решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутта четвертого порядка с параметрами следующей итерации.
11. Дробление шага метода Ньютона – Рафсона, переход к п.5.
12. Вывод оптимальных значений параметров управления, графиков траекторных характеристик КА, графиков зависимости параметра управления λ и функции переключения δ от времени, траектории перелета КА.

Полученная математическая модель допускает модернизацию, на ее основе могут быть смоделированы различные межпланетные перелеты с двигателем малой тяги.