

УДК 629.78

Исследование структуры решений задачи энергетически оптимального перелета между компланарными эллиптической и круговой орбитами

Корнеев Кирилл Романович^(*)

kirill_rnd@mail.ru

Трофимов Сергей Павлович

sertrofimov@yandex.ru

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследуется задача перелета между компланарными эллиптической и круговой орбитами. Энергетически оптимальные траектории перелета находятся из численного решения краевой задачи принципа максимума Понтрягина. Проводится параметрический анализ оптимальных решений для семейства эллиптических орбит разного размера и формы. Полученные результаты используются в задаче выбора оптимальной величины отлетной асимптотической скорости для траектории перелета Земля — Марс.

Ключевые слова: малый космический аппарат, электрореактивная двигательная установка, энергетически оптимальная траектория, принцип максимума Понтрягина, гиперболический избыток

Введение. Исследование Марса, Венеры и других планет Солнечной системы является перспективным направлением современной отечественной космонавтики. Использование малых космических аппаратов (МКА) в совокупности с электрореактивными двигательными установками (ЭРДУ) позволяет сократить расходы рабочего тела и удешевить межпланетные миссии. Проведение баллистического анализа на этапе предварительного проектирования миссии с ЭРДУ — это вычислительно затратный процесс.

Материалы и методы; результаты. Самой простой моделью при оптимизации межпланетных траекторий МКА с ЭРДУ является компланарный перелет между эллиптической и круговой орбитами. Работу ЭРДУ будем описывать моделью идеально регулируемого двигателя постоянной мощности, в которой задача минимизации расхода рабочего тела сводится к минимизации квадратичного функционала [1]

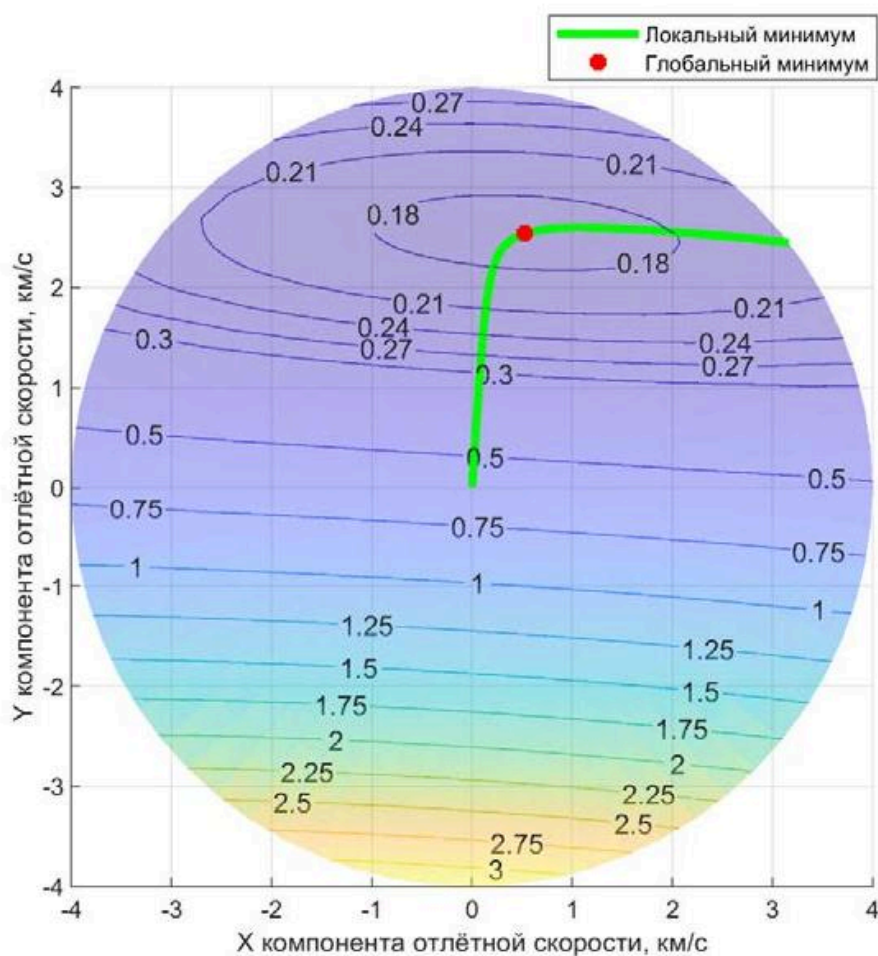
$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} a^2 dt.$$

Здесь a — реактивное ускорение, сообщаемое аппарату двигателем. Траектории, на которых данный функционал достигает минимума, называются энергетически оптимальными.

В результате применения необходимых условий оптимальности, содержащихся в принципе максимума Понтрягина [2], построение оптимального перелета между заданными эллиптической и круговой орбитами сводится

к решению двухточечной краевой задачи. Подробности про численную процедуру решения краевой задачи принципа максимума в регулярных переменных Кустаанхеймо — Штифеля приведены в недавней статье авторов [3]. Для задачи выбора оптимального гиперболического избытка скорости при отлете МКА от Земли семейство стартовых эллиптических орбит было параметризовано двумя компонентами отлетной асимптотической скорости.

На рисунке показаны изолинии квадратичного функционала на плоскости компонент отлетной асимптотической скорости для энергетически оптимальных перелетов Земля — Марс. Орбиты планет моделируются компланарными окружностями радиуса 1 и 1,52 астрономических единицы, соответственно. Величина отлетной скорости — гиперболический избыток скорости — варьировалась от 0 до 4 км/с, а ее направление задавалось углом от 0 до 2π радиан. Для фиксированного гиперболического избытка скорости существует локальный минимум функционала, представленный на рисунке в виде зеленых точек, образующих некоторую кривую. Вдоль этой кривой имеется и глобальный минимум, соответствующий величине отлетной скорости 2,6 км/с.



Изолинии квадратичного функционала при варьируемой отлетной скорости

Заключение. Для удобства генерации начального приближения в задачах траекторной оптимизации были построены аппроксимации основных харак-

теристик энергетически оптимальных траекторий (время перелета, значение функционала) по угловой дальности перелета и двум безразмерным параметрам, характеризующим геометрию задачи. В качестве последних выбраны отношения перицентрального и апоцентрального расстояний эллиптической орбиты к радиусу круговой орбиты.

*Работа выполнена при поддержке гранта
Российского научного фонда (РНФ) № 24-11-00038.*

Список источников

- [1] Гродзовский Г.Л., Иванов Ю.Н., Токарев В.В. *Механика космического полета с малой тягой*. Москва, Наука, 1966, 678 с.
- [2] Понтрягин Л.С. и др. *Математическая теория оптимальных процессов*. Москва, Наука, 1976, 392 с.
- [3] Korneev K.R., Trofimov S.P. Low-Thrust Trajectory Optimization in Kustaanheimo–Stiefel Variables. *Cosmic Research*, 2024. vol. 62, no. 3, pp. 256–265.