

УДК 629.78

Математическое моделирование движения космического аппарата с прямоточным воздушным электрореактивным двигателем

Сущенко Александр Александрович

suchshenya@yandex.ru

Самыловский Иван Александрович

ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

SPIN-код: 4756-1342

ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена концепция применения прямоточных воздушных электрореактивных двигателей (ПВЭРД) для поддержания длительного полета на низких и сверхнизких орбитах (80–250 км). Представлена математическая модель движения космического аппарата с ПВЭРД, учитывающая переменную плотность атмосферы и неточечность гравитационного поля Земли. Проведены численные эксперименты, проведено сравнение и сделаны выводы по поводу возможности использования ПВЭРД для обеспечения стабильной орбиты и компенсации аэродинамического сопротивления на исследуемых высотах.

Ключевые слова: математическое моделирование, численное моделирование, динамика полета, космический аппарат, прямоточный электрореактивный двигатель, сверхнизкие орбиты

Введение. Космические аппараты в силу специфики поставленных перед ними целей занимают орбиты самых разных высот. Сверхнизкие орбиты (80–250 км) представляют интерес для таких областей, как коммуникации, дистанционная съемка Земли а также научные исследования атмосферы и атмосферных явлений Земли. Однако использование подобных орбит порождает проблему необходимости использования компенсаторных двигательных установок для поддержания длительного срока существования КА в условиях разреженной атмосферы. Электрореактивные двигатели обладают высоким удельным импульсом, что позволяет добиться желанного результата с меньшими затратами топлива. Прямоточный ЭРД предоставляет возможность еще больше сократить запасы рабочего тела на борту или вовсе избавиться от их необходимости [1–3].

Цель работы заключается в исследовании математической модели движения спутника с ПВЭРД для оценки параметров его орбиты и возможности осуществления долгосрочной деятельности на выбранной орбите. Задачи, поставленные в работе, включают в себя разработку математической модели движения и вращения КА с ПВЭРД, ее программную реализацию, проведение численных экспериментов и получение результирующих данных для сравнения исследуемых случаев.

Методы и материалы; результаты. Исследование выполнено методами математического и компьютерного моделирования. Основой работы является разработанная модель динамики космического аппарата формы параллелепи-

пед с прямоточным воздушно-реактивным двигателем. Модель включает гравитационное поле Земли с учетом гармоник до пятого порядка, атмосферу с экспоненциальным спадом плотности и ветровыми возмущениями, а также силу тяги ПВЭРД, линейно зависящую от параметров набегающего потока. Вращательное движение описывается с помощью уравнения на кватернионы ориентации. Материалом исследования служили данные численных экспериментов с варьированием параметров орбиты и режимов управления аппаратом [4, 5].

Результаты расчетов показали возможности долговременной стабилизированной орбиты на высотах 80–250 км за счет компенсации аэродинамического сопротивления тягой ПВЭРД. Установлен экспоненциальный рост требуемой тяги при снижении высоты. Качественно оценено влияние нецентральности гравитационного поля. Показано, что оптимальная для забора газа ориентация КА может отклоняться от вектора скорости из-за вращения и возмущений атмосферы. Смоделирован сценарий отказа системы управления, демонстрирующий работу двигательной установки в пассивном режиме.

Заключение. Проведены численные эксперименты с моделированием полета на различных орбитах КА с разными режимами управления. Дальнейшие направления для исследований — переход к более детализированной модели взаимодействия разреженного газа атмосферы с КА.

Список источников

- [1] Сазонов В.В., Барбашова Т.Ф. *Гравитационная ориентация искусственных спутников Земли: специальный курс*. Москва, КУРС, 2023, 144 с.
- [2] Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. *Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела*. Москва, Наука, 1973, 320 с.
- [3] Голубев Ю.Ф. *Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела*. Москва, Ордена Ленина институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, 2013, 23 с.
- [4] Авдюшев В.А. *Численное моделирование орбит*. Томск, Изд-во Науч.-техн. лит., 2010, 282 с.
- [5] Овчинников М.Ю., Герман А.Д., Маштаков Я.В., Ролдугин Д.С. Моделирование динамики низколетящего космического аппарата с прямоточным воздушным электрореактивным двигателем. *Математическое моделирование*, 1997, № 11, т. 33, с. 18–38.