

УДК 629.78

Синтез оптимального управления тягой воздушного электрореактивного двигателя на ультранизких орбитах

Янова Ольга Васильевна^(*)

yanova2007@yandex.ru

Филатьев Александр Сергеевич

filatyev@yandex.ru

Голиков Александр Александрович

agorgy@yandex.ru

Задириев Илья Игоревич

s_333_52@mail.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. В результате исследования структуры оптимального управления тягой воздушного электрореактивного двигателя (ВЭРД) разработан аналитический синтез управления тягой на эллиптических орбитах с ультранизким перигеем, основанный на компенсации изменений радиусов перигея и апогея орбиты, обусловленных аэродинамическим сопротивлением космического аппарата (КА). Получены оценки диапазонов допустимых значений параметров КА, ВЭРД и орбит для длительного поддержания КА на околоземных орбитах.

Ключевые слова: воздушный электрореактивный двигатель, космический аппарат, ультранизкие орбиты, оптимальное управление, скорость истечения

Введение. Как показали исследования [1, 2], в условиях дефицита энергии для обеспечения длительного поддержания КА с ВЭРД на ультранизких высотах эллиптические орбиты предпочтительнее круговых благодаря использованию на активных участках энергии, накопленной на больших высотах. При этом условием поддержания КА является компенсация аэродинамического сопротивления не только при работе ВЭРД, но и на участках пассивного полета КА. Исходя из этого разработан аналитический синтез управления тягой из ВЭРД, позволяющий провести параметрические исследования влияния на движение КА параметров КА, ВЭРД и орбит с целью определения областей их допустимых значений для обеспечения длительного полета КА без решения краевых задач.

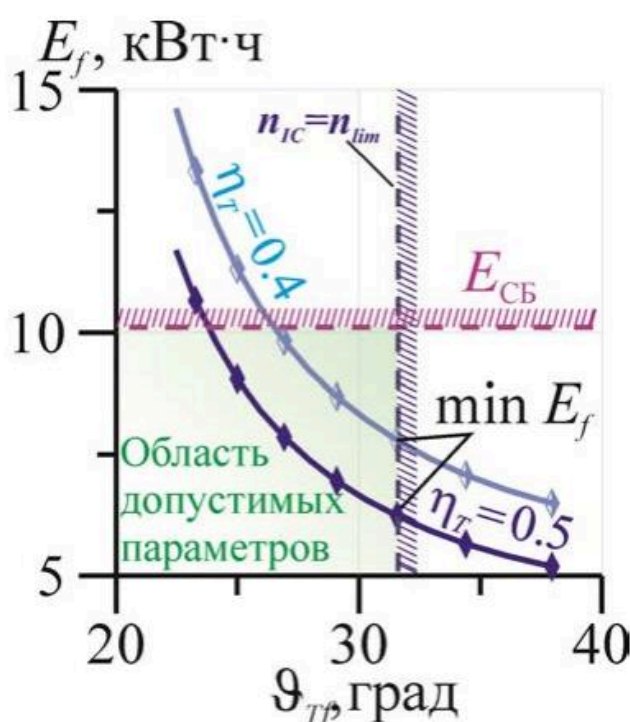
Материалы и методы; результаты. В силу малости возмущающего воздействия тяги и атмосферного сопротивления [1], приняты допущения: 1) о компенсации изменений радиусов перигея r_π и апогея r_α за виток орбиты, 2) о возможности расчета изменений, вызванных аэродинамическим сопротивлением $\Delta r_{\pi,\alpha}(A)$ и тягой $\Delta r_{\pi,\alpha}(T)$, на номинальной траектории КА как независимых аддитивных слагаемых. Тогда условия поддержания КА записываются в виде системы двух уравнений:

$$\begin{cases} \Delta r_\alpha(A) + \Delta r_\alpha(T) = 0, \\ \Delta r_\pi(A) + \Delta r_\pi(T) = 0, \end{cases}$$

решение которой позволяет определить значения параметров циклограммы тяги: углы истинной аномалии $[\vartheta_{Ti}, \vartheta_{Tf}]$ в начальный и конечный моменты

активного участка на половине витка орбиты (на оставшейся части его расположение симметрично относительно оси апсид) и скорость истечения c (бесконечное множество решений). Оптимальное решение определялось по критерию минимума энергии, затрачиваемой для компенсации аэродинамического сопротивления: $\min E_f$.

На рисунке показана зависимость $E_f(\vartheta_{Tf})$ для тягового КПД ВЭРД $\eta_T = 0,4$ и $0,5$. Видно, что $\min E_f$ соответствует совпадению ϑ_{Tf} с окончанием работы ВЭРД с учетом ограничения на концентрацию газа в ионизационной камере ВЭРД $n_{IC} > n_{lim}$. Зеленым выделена область допустимых значений в координатах ϑ_{Tf} и E_f .



Зависимость энергии E_f , затрачиваемой для компенсации аэродинамического сопротивления, от угла истинной аномалии ϑ_{Tf} окончания активного участка

Заключение. На основании решения оптимизационных задач с использованием принципа максимума Понтрягина [1] разработан аналитический синтез управления тягой ВЭРД. Получены диапазоны допустимых для длительного существования КА значений параметров КА, ВЭРД, радиусов апсид и циклограммы тяги: скорости истечения, начала и конца активных участков.

Исследование проведено в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова в рамках поддержки междисциплинарных научно-образовательных школ, соглашение №23-Ш01-07.

Список источников

- [1] Филатьев А.С., Янова О.В. Оптимальное управление вектором тяги воздушного электрореактивного двигателя для наискорейшего изменения высоты апогея орбиты с ультранизким перигеем. *Космические исследования*, 2023, т. 61, № 2, с. 1–13. <https://doi.org/10.31857/S0023420622600222>
- [2] Tisaev M., Ferrato E., Giannetti V. et al. Air-breathing electric propulsion: flight envelope identification and development of control for long-term orbital stability. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 191, pp. 374–393. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.11.011>