

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ МИКРОУСКОРЕНИЙ НА КОСМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

© 2012 А. В. Седельников, Е. Ю. Сыгурова, А. А. Киреева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В работе предлагается использование в двигательной установке космической лаборатории электроракетного двигателя, позволяющего существенно увеличить интервал между двумя последовательными включениями жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Таким образом, появляется возможность проведения более длительных гравитационно-чувствительных процессов.

Электроракетный двигатель, космическая лаборатория, микроускорения.

Идею использования для ускорения рабочего тела в реактивных двигателях электрической энергии высказывал К. Э. Циолковский. В 1916—1917 годах Р. Годдард провёл первые эксперименты, а в 30-х годах XX столетия в СССР под руководством В. П. Глушко был создан один из первых действующих электроракетных двигателей (ЭРД) [1]. Идея использования ЭРД для ориентации космического аппарата (КА) была запатентована в 1998 году [2]. Однако в условиях жёсткой ориентации [3] тяги ЭРД будет недостаточно, поэтому импульсные жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРД МТ) будут по-прежнему необходимы. Включаясь, они создают недопустимо высокий (порядка 1 мм/с²) уровень микроускорений. Поэтому задача увеличения интервала между двумя последовательными включениями ЖРД МТ является очень актуальной для космического материаловедения [4]. В данной работе рассматривается идея использования непрерывно работающего ЭРД для увеличения этого интервала. Исследования проводятся для проекта космической лаборатории типа «ОКА-Т».

С одной стороны, момент от ЭРД будет препятствовать накоплению кинетического момента гироскопическими устройствами системы ориентации, что позволит увеличить интервал между последовательными включениями ЖРД МТ. С другой - постоянно работающий ЭРД будет дополнительным источником микроускорений, поскольку создаваемый им момент порождает собственные колебания больших упругих

элементов. Поэтому для решения задачи необходимо с учётом ограничений модуля микроускорений подобрать параметры ЭРД, позволяющие существенно увеличить интервал, не нарушая при этом благоприятных условий для проведения технологических процессов.

При моделировании движения КА воспользуемся гипотезой о его вращательном движении вокруг центра масс, представляя упругие элементы однородными ортотропными пластинами. Для этого случая уравнения движения и собственных колебаний упругих элементов будут выглядеть следующим образом [4]:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} \varepsilon_x + \sum_{k=1}^n \rho_k h_k \int_0^{a_k} \int_0^{b_k} A_x \frac{\partial^2 w_k}{\partial t^2} dv_k ds_k &= M_x, \\
 I_{yy} \varepsilon_y + \sum_{k=1}^n \rho_k h_k \int_0^{a_k} \int_0^{b_k} A_y \frac{\partial^2 w_k}{\partial t^2} dv_k ds_k &= M_y, \\
 I_{zz} \varepsilon_z + \sum_{k=1}^n \rho_k h_k \int_0^{a_k} \int_0^{b_k} A_z \frac{\partial^2 w_k}{\partial t^2} dv_k ds_k &= M_z, \\
 A_x &= \alpha_{11}^k (Ry_k + v_k) - \alpha_{12}^k (Rx_k + s_k), \\
 A_y &= \alpha_{21}^k (Ry_k + v_k) - \alpha_{22}^k (Rx_k + s_k), \\
 A_z &= \alpha_{31}^k (Ry_k + v_k) - \alpha_{32}^k (Rx_k + s_k), \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 w_k}{\partial t^2} + \varepsilon_{xk} (Ry_k + v_k) - \varepsilon_{yk} (Rx_k + s_k) + \\
 + \frac{1}{\rho_k h_k} \left(D_{1k} \frac{\partial^4 w_k}{\partial s_k^4} + D_{2k} \frac{\partial^4 w_k}{\partial v_k^4} + 2D_{12k} \frac{\partial^4 w_k}{\partial s_k^2 \partial v_k^2} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – тензор инерции КА в главных осях, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ и $\varepsilon_{xk}, \varepsilon_{yk}, \varepsilon_{zk}$ – проекции

вектора углового ускорения на оси связанной и k -й местной систем координат, α_{ij}^k – тензор направляющих косинусов между k -м упругим элементом и связанной системой координат, s_k, v_k, w_k – компоненты вектора, определяющего положение точек k -го упругого элемента в k -й местной системе координат, Rx_k, Ry_k, Rz_k – координаты точки крепления k -го упругого элемента в связанной системе координат, D_{1k}, D_{2k}, D_{12k} – жёсткость k -го упругого элемента в продольном, поперечном направлениях на изгиб и при сдвиге соответственно, ρ_k – плотность, h_k – толщина, a_k –

длина, b_k – ширина k -го упругого элемента, M_x, M_y, M_z – проекции вектора возмущающего момента на оси связанной системы координат, n – число упругих элементов КА.

Проводя численное моделирование для схемы КА типа «ОКА-Т» [3], получаем зависимость микроускорений от времени при постоянной работе ЭРД. При этом в качестве ЭРД выбраны двигатели СПД-60, 70 и 100, выпускаемые ОКБ «Факел», с тягой соответственно 30, 40 и 83 мН. На рис. 1 представлена зависимость микроускорений от времени при постоянной работе двигателя СПД-100.



Рис. 1. Динамика микроускорений от времени при постоянной работе СПД-100 для КА типа «ОКА-Т»

На диаграмме рис. 2 представлены максимальные значения микроускорений, создаваемые стационарными плазменными двигателями СПД-60, 70, 100 и 140 для КА типа «ОКА-Т». Видно, что более мощный двигатель СПД-140 тягой до 300 мН создаёт максимальные микроускорения порядка 7 мкм/с², а требования, предусмотренные проектом «ОКА-Т», предполагают, что микроускорения не превысят 10 мкм/с². Поскольку ЭРД – не единственный источник микроускорений, то работа СПД-140 может в совокупности с другими факторами превзойти допустимое значение.

Рассмотрим влияние работы указанных двигателей на интервал между включениями ЖРД МТ. Используем систему (1) и теорему об изменении кинетического момента:

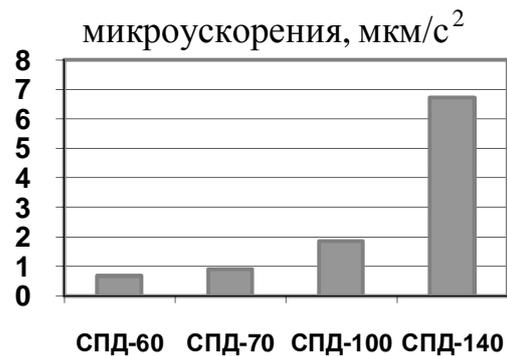


Рис. 2. Максимальные микроускорения, создаваемые непрерывной работой различных ЭРД для КА типа «ОКА-Т»

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_e + \vec{M}_{\text{ЭРД}}, \tag{2}$$

где \vec{L} – вектор кинетического момента гироскопических устройств КА, \vec{M}_e – возмущающий момент, способствующий разори-

ентации КА, $\vec{M}_{ЭРД}$ – момент, создаваемый ЭРД.

Оценка времени разориентации различных космических лабораторий без применения ЭРД приведена в работах [5, 6]. Оценим максимальный эффект от работы ЭРД, считая, что вектор $\vec{M}_{ЭРД}$ всегда противоположен вектору \vec{M}_g . В этом случае, согласно теореме об изменении кинетического момента (2), его производная будет минимальной, а время разориентации – максимальным. Будем полагать, что оба момента постоянны, а начальная угловая скорость вращения КА вокруг центра масс равна нулю. Тогда для инерционно-массовых характеристик КА типа «ОКА-Т» [3] получим увеличение времени разориентации, которое в процентах показано на рис. 3. Это время можно считать временем увеличения интервала между двумя последовательными включениями УРД. В докладе [7] отмечено, что современные гиромаховичные устройства

позволяют УРД включаться приблизительно каждые 12 часов для разгрузки кинетического момента. Сверху на диаграмме рис. 3 отмечено время увеличения этого интервала при условии, что без применения ЭРД оно составляло 12 часов.

Следует отметить, что приведённые данные являются максимальной оценкой для случая, когда векторы моментов всегда противоположны. В реальной ситуации это увеличение времени окажется ниже за счёт того, что такой идеальный закон управления направлением тяги ЭРД на практике реализовать не удастся. Сравнивая рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что СПД-140 даёт самую весомую прибавку времени разориентации, однако создаёт недопустимо высокие микроускорения. Двигатель СПД-100 полностью удовлетворяет по уровню микроускорений, однако за счёт того, что его тяга примерно в 3,6 раз меньше, прибавка по времени получается ниже почти в 5 раз.

Увеличение времени разориентации, %

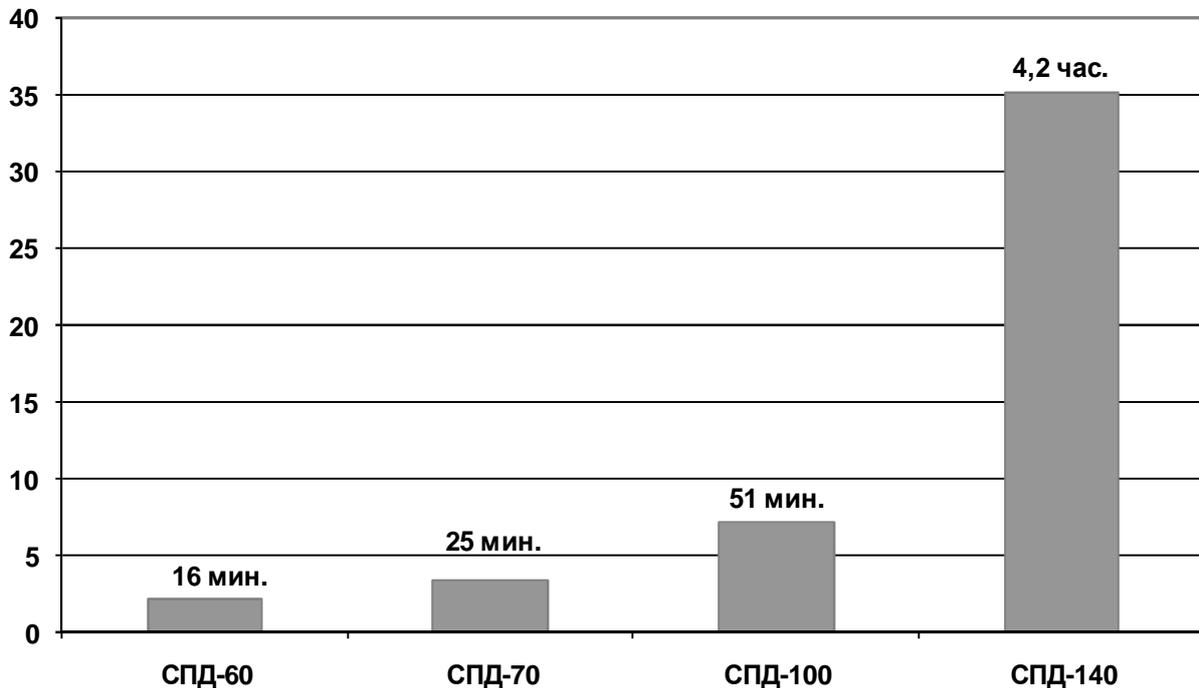


Рис. 3. Максимальная прибавка времени разориентации, получаемая благодаря непрерывной работе различных ЭРД для КА типа «ОКА-Т»

Применение двигателей СПД-60 и 70 для КА типа «ОКА-Т» вряд ли будет оправдано, поскольку соответствующие прибавки связаны с дополнительным расходом мощности примерно 0,5-0,6 кВт/ч и массы полезной нагрузки 1,2-1,5 кг. Однако при уве-

личении интервала между включениями УРД за счёт гиромаховичных устройств применение таких двигателей может оказаться возможным.

В этой ситуации возможен вариант создания другого двигателя ЭРД тягой в 150

мН. Его работа не создаст микроускорений выше 4 мкм/с^2 , при этом максимальное увеличение времени разориентации составит около 13,8%, т.е. примерно 1,65 ч в случае 12-часового интервала между включениями УРД без применения ЭРД.

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать об эффективности применения ЭРД как разработанных и выпускаемых серийно, так и перспективных, созданных специально для решения задач космического производства. Создавая небольшие микроускорения, не превышающие 40% от допустимых значений, за счёт своей постоянной работы, они позволяют получить 10-13%-ную прибавку интервала между двумя последовательными включениями УРД, что при 12-часовом интервале составляет около 1,5 часов. Это позволит проводить более длительные по времени реализации технологические процессы. При продолжительной эксплуатации космической лаборатории такая прибавка будет ещё более весомой. Техническое обслуживание ЭРД и его заправку рабочим веществом можно производить во время сближения «ОКА-Т» с МКС при запуске нового цикла технологических процессов.

Данная работа выполнена в рамках программы «У.М.Н.И.К.» при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по проекту «Инновационные разработки двигательных установок для космических минизаводов».

Библиографический список

1. Кейвни, Л. Космические двигатели: состояние и перспективы. [Текст] / Л. Кейвни.- М.: Мир, 1988. – 454 с.
2. US Patent 6032904.
3. Седельников, А.В. Проблема микроускорений: от осознания до фрактальной модели [Текст] / А.В. Седельников // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий – М.: РАН, 2010. – 106 с.
4. Sedelnikov, A.V. Alternative solution to increase the duration of microgravity calm period on board the space laboratory [Text] / A.V. Sedelnikov, A.A. Kireeva / Acta Astronautica. – 2011. – Vol. 69. – № 6-7. – P. 480-484.
5. Седельников, А.В. Оценка вероятности ориентации космического аппарата типа «НИКА-Т» в пассивном режиме [Текст] / А.В. Седельников // Вестн. ИжГТУ. – 2011. – № 3(51). – С. 178-181.
6. Седельников, А.В. Использование электроракетного двигателя в двигательной установке при ориентации космической лаборатории [Текст] / А.В. Седельников, А.А. Серпухова // Фундаментальные исследования. – 2010. – № 12. – С. 153-157.
7. Игнатов, А.И. Использование электромеханических исполнительных органов для реализации режимов вращательного движения ИСЗ с малым уровнем микроускорений [Текст] / А.И. Игнатов // Материалы XXXIII академических чтений по космонавтике. – М.: Комиссия РАН, 2009. – С. 137-138.

THE USE OF ELECTRIC ENGINE TO REDUCE THE MICROACCELERATIONS LEVEL OF SPACE LAB

© 2012 A. V. Sedelnikov, E. Yu. Sygurova, A. A. Kireeva

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

We propose the use of laboratory space propulsion electric propulsion, can significantly increase the interval between two subsequent liquid rocket thrusters. Thus there is the possibility of a longer gravity-sensitive processes.

Electric propulsion, space lab, microaccelerations.

Информация об авторах

Седельников Андрей Валерьевич, доцент, кандидат физико-математических наук, докторант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: axe_backdraft@inbox.ru. Область научных интересов: моделирование поля микроускорений внутренней среды КА.

Сыгурова Екатерина Юрьевна, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: katrin_s@list.ru. Область научных интересов: разработка ЭРД для ориентации космической лаборатории.

Киреева Анастасия Андреевна, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: asa-89@bk.ru. Область научных интересов: разработка ЭРД для ориентации космической лаборатории.

Sedelnikov Andrew Valerievich, associate professor, candidate of physical and mathematical sciences, doctorant of the department of design of aircraft engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: axe_backdraft@inbox.ru. Area of research: Modeling microaccelerations field environment inside the spacecraft.

Sygurova Ekaterina Yurjevna, undergraduate Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: katrin_s@list.ru. Area of research: the development of electric propulsion for the orientation of the scientific laboratory.

Kireeva Anastasija Andreevna, an engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: asa-89@bk.ru. Area of research: the development of electric propulsion for the orientation of the scientific laboratory.