УДК 629.78

Э. А. ЛАПХАНОВ, А. С. ПАЛИЙ

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR SPACECRAFT REMOVAL FROM LOW EARTH ORBITS USING ONBOARD-PRODUCED ELECTROMAGNETIC AND MAGNETIC FIELDS

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: Ernando@i.ua

Цель статьи – анализ эффективности применения двигательных установок с постоянными магнитами в качестве альтернативного способа увода объектов космического мусора с низких околоземных орбит.

В работе рассмотрены текущие задачи, связанные с разработкой методов и созданием средств увода космических аппаратов, срок активного существования которых закончился, с рабочих орбит с помощью собственных электромагнитных и магнитных полей, генерируемых с помощью различных магнитных устройств. Проведен обзор современных систем увода космических аппаратов, базирующихся на генерации собственного электромагнитного поля, которое при взаимодействии с динамическим потоком ионосферной плазмы и магнитным полем Земли создает тормозящую силу и таким образом уводит космический аппарат с орбиты. Определены преимущества и недостатки электромагнитных двигательных систем космических аппаратов. Предложены альтернативный метод и система увода с орбиты объектов космического мусора с помощью двигательных устройств на постоянных магнитах. Представлена конструктивная схема устройства с постоянными магнитами, и предложен алгоритм принципа ее действия. Проведен анализ экранов для магнитных и электромагнитных полей, и выбран наиболее подходящий экранирующий материал. Выбранный экранирующий материал представляет собой многослойный экран, состоящий из алюминиевых, медных и магнитных слоев. Разработана математическая модель орбитального движения космического аппарата с устройством на постоянных магнитах. С помощью пакета прикладных программ SciLab рассчитано время увода для разных космических аппаратов и высот орбит. Исходя из полученных результатов расчета сделан вывод, что эффективность воздействия тормозящей силы зависит от соотношения между инерционными характеристиками космических аппаратов и объемов постоянных магнитов, которые устанавливаются на данные аппараты. Определено, что для больших космических аппаратов, массой свыше 2 т, использование двигательных устройств с постоянными магнитами в качестве систем увода является неэффективным. Это обуславливается непропорциональностью между ростом тормозящей силы в зависимости от объема постоянного магнита и ростом инерциальных характеристик космического аппарата при увеличении его массы. Опираясь на данные результаты, определены границы эффективного применения двигательных устройств с постоянными магнитами.

Ключевые слова: *постоянные магниты, космический аппарат, системы увода космических аппаратов, магнитное поле, электромагнитное поле, электрическое поле, динамический поток ионосферной плазмы.*

1. The Orbital Debris Quarterly News. NASA JSC Houston. 2018. Iss 2. Vol. 22. P. 8
2. *Christophe Bonnal, Jean-Marc Ruault, Marie-Christine Desjean.* Active debris removal: Recent progress and current trends. Acta Austronautica. April – May 2013, Vol. 85, P. 51 – 60.
3. The clean space blog. European Space Agency. 2018. URL: http://blogs.esa.int/cleanspace/2018/04/27/active-debris-removal-to-enable-space-servicing-vehicles/ . (date of access 03.09.2018).
4. *Палий А.С.* Методы и средства увода космических аппаратов с рабочих орбит (состояние проблемы). Техническая механика. 2012. №1. С. 94 – 102.
5. *Палий А.С., Скорик А.Д.* Анализ возможности использования аэродинамических систем для увода модульных крупногабаритных космических объектов с низких околоземных орбит. Техническая механика. 2014. №2. С. 43 – 51.
6. *Winglee R.M., Slough J., Ziemba T., Goodson A.* Mini-Magnetospheric Propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion. Journal of geophysical research. 2000. Vol. 105. NO. A9. P 21067 – 21077.
7. *Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa*. Solar Wind Sails, Exploring the Solar Wind, Dr. Marian Lazar (Ed.). ISBN: 978-953-51-0339-4. InTech. 2012. P. 439 – 463. URL: https://www.intechopen.com/books/exploring-the-solar-wind/solar-wind-sails (date of access 03.09.2018).
8. *Hoyt R., Forward R*. Performance of the Terminator Tether for Autonomous Deorbit of LEO Spacecraft. AIAA-99-2839 35-th Join Propulsion Conference & Exhibit. 20 – 24 June. Los Angeles. 1999. P. 1 – 10.
9. *Hoyt R., Forward R*. Application of the terminator tether™ electrodynamic drag technology to the deorbit of constellation spacecraft. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. 1998. P. 1 – 19. URL: http://www.tethers.com/papers/TTPaper.pdf (date of access 03.09.2018).

10. *Carmen Pardini, Toshiya Hanada, Paula H. Krisko*. Benefits and Risks of using electrodynamic tethers to deorbit spacecraft. IAC-06-B6.2.10. URL: https://www.iadc-online.org/Documents/IADC-06-08.pdf (date of access 03.09.2018).
11. *Yasumasa Ashida*. Study on propulsive characteristics of magnetic sail and magneto plasma sail by plasma particle simulations: PhD dissertation. Kioto. 2014. P. 7 – 50. URL: https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/185206/2/dkogk03813.pdf (date of access 03.09.2018).
12. *Шувалов В. А., Кучугурный Ю. П.* Экспериментальное обоснование концепции искусственной мини-магнитосферы как средства управления движением космических аппаратов в ионосфере Земли. Космическая наука и технология. 2018. Т.24 №2. С. 43 – 46.
13. *Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Pis'menny N. I., Kochubei G. S.* Control of the drag on a spacecraft in the earth's ionosphere using the spacecraft's magnetic field. Acta Astronautica. 2018. Vol. 151. P. 717 – 725.
14. *Shuvalov V. A., Tokman N.A., Pis'mennyi N.I., Kochubei G.S.* Dynamic Interaction of a Magnetszed Body with a Rarefied Plasma Flow. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2016. r.57. №1. P. 145 – 152.
15. Патент України на корисну модель № 125265, МПК B64G 1/00, B64G 1/10, B64G 1/24. Спосіб орбітального перельоту космічного об'єкта. *Шувалов В. О., Дегтяренко П. Г., Симанов В. Г., Хорольський П. Г., Лобода П. І.* u2017 09603 ; заявл. 02.10.2017 ; опубл. 10.05.2018.
16. *Лапханов Э. А., Палий А. С.* Современные задачи связанные с созданием и уводом с орбиты группировок космических аппаратов класса нано и пико. Авиационно-космическая техника и технология. 2018, № 4 (148). С. 20 – 35.
17. *Лапханов Э. О., Палий А. С.* Анализ возможности применения двигательной установки с постоянным магнитом для космических аппаратов на околоземную орбиту. Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. Днепр, 2018. Выпуск 4 (117). С.24 – 35.
18. Заявка на патент України на винахід № a201801742, МПК B 64 G 1/62. Спосіб очищення навколоземного простору від об'єктів космічного сміття шляхом відведення їх з орбіти за допомогою власного магнітного поля [Текст] / *Шувалов В. О., Палій О. С., Лапханов Е. О*. № a201801742, заявл. 21.02.2018.
19. *Абасов Р. К.* Применение углеродных материалов в экранировании электромагнитных полей. Политехнический молодежный журнал. 2016. №5. С. 1 – 9.
20. *Островский О. С., Одаренко Е. Н., Шматько А. А.* Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн. ФИП. 2003. Том. 1 №2. С. 161 – 173.
21. *Сафонов А. Л., Сафонов Л. И.* Электрические прямоугольные соединители. Многослойные металлизированные экраны защиты от ЭМП и способы их получения. Технологии в электронной промышленности. 2015. №1. С. 64 – 69.
22. *Dmitrenko V. V., Phyo Wai Nyunt, Vlasik K. F., Grachev V. M., Grabchikov S. S., Muravyev-Smirnov S. S., Novikov A. S., Ulin S. E., Uteshev Z. M., Chernysheva I. V., Shustov A. Y.* Electromagnetic Shields Based on Multilayer Film Structures. Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2015 Vol 42. № 2. P. 43 – 47.

Получено 14.09. 2018,
в окончательном варианте 10.12.2018.