

А. И. Маслова, А. В. Мищенко, А. В. Пироженко, Д. А. Храмов

Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Днепрпетровск

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО УСТРОЙСТВА ПАССИВНОГО УВОДА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ

Кратко излагаются основные результаты работ по исследованиям динамики электродинамических космических тросовых систем. Приведены результаты исследований динамики развертывания тросовой системы и резонансной неустойчивости колебаний системы относительно центра масс под действием амперовых и аэродинамических моментов, а также результаты оценок времени увода космических объектов с низких околоземных орбит с помощью электродинамических тросовых систем.

Ключевые слова: электродинамическая космическая тросовая система, развертывание, резонансные колебания.

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы увода космических объектов с низких околоземных орбит является использование электродинамических космических тросовых систем (ЭДКТС). К настоящему времени это является общепринятым мнением, поскольку использование ЭДКТС предоставляет уникальные возможности создания экономически эффективной пассивной системы увода [2, 4, 5, 7].

Интенсивные исследования задач функционирования ЭДКТС на низких околоземных орбитах длятся уже более двух десятков лет. Применительно к решению проблемы увода космического мусора основное внимание в исследованиях уделяется гравитационно стабилизированной ЭДКТС. К настоящему времени в этих исследованиях получено большое коли-

чество содержательных результатов [2—4, 6, 7]. Вместе с тем результаты исследования динамики ЭДКТС показывают неустойчивость ее радиального положения, связанную с резонансами колебаний системы относительно центра масс под действием амперовых и аэродинамических моментов. Эта неустойчивость существенно затрудняет реализацию проекта создания эффективной системы увода на основе радиальной ЭДКТС и требует дополнительных исследований.

На основе анализа модели взаимодействия ЭДКТС с магнитосферой и ионосферой Земли был сделан вывод [1], что развитие направления ЭДКТС в первую очередь связано с получением достоверных экспериментальных данных функционирования системы в натуральных условиях. В ИТМ НАНУ и ГКАУ был предложен проект малой экспериментальной ЭДКТС для проведения натуральных экспериментов. Этот проект победил в

конкурсе работ Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

Основное содержание работ по проекту, предполагалось, будет связано с исследованием динамики и с подготовкой орбитальных экспериментов для малой ЭДКТС. Вместе с тем в соответствии с планом совместных научно-исследовательских работ ГП «КБ «Южное» и научными учреждениями НАН Украины в проекте рассматриваются вопросы возможности использования ЭДКТС для увода верхних ступеней ракет космического назначения разработки ГП «КБ «Южное».

В статье приводятся краткое описание результатов работ по договору № П-16-13-2 «Исследования особенностей и механизмов управления орбитальным движением космических аппаратов в токопроводящей среде» (Этап 2 — «Динамика взаимодействия намагниченного КА и электродинамической тросовой системы с токопроводящей средой»), выполняемому в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

ДИНАМИКА РАЗВЕРТЫВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена динамика ЭДКТС при различных способах разворачивания: при медленном выталкивании тросового соединения; при разматывании троса с безынерционной катушки; при разматывании троса с барабана с постоянной скоростью. Для способа, когда трос выдвигается из тела с постоянной скоростью, доработана математическая модель с учетом весомости троса. Трос моделируется с помощью материальных точек, соединенных упруго-диссипативными связями. Это позволило существенно упростить уравнения движения системы, по сравнению с ранее рассмотренной моделью, где эти связи предполагались нерастяжимыми.

Усовершенствована компьютерная библиотека моделирования и визуализации динамики ЭДКТС. В библиотеку добавлены модули, отвечающие за обработку столкновений между телами системы, ряд классов, моделирующих связи (в частности, неудерживающие) и методов чис-

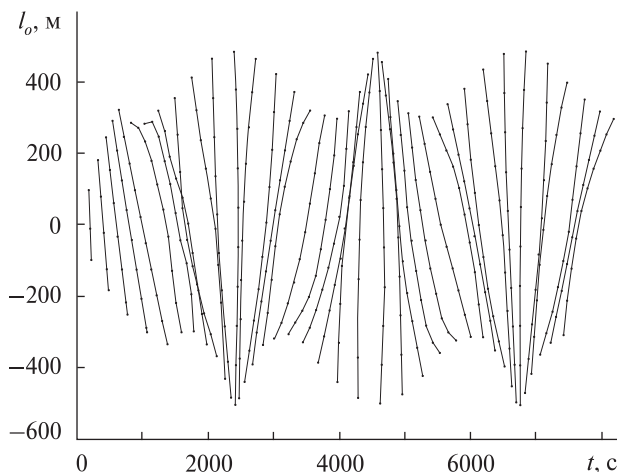


Рис. 1. Развертывание и последующее движение тросовой системы при скорости выпуска троса 1 м/с

ленного интегрирования. Проведенное тестирование показало работоспособность разработанных модулей.

Моделирование медленного разворачивания троса (скорость разворачивания не превышает 1 м/с) показало стабильность процесса разворачивания, и что масса троса не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на характер разворачивания. На рис. 1 показано изменение во времени проекции троса l_0 на орбитальную плоскость.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИКИ РАДИАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ СИСТЕМЫ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Одним из важнейших вопросов создания радиальной ЭДКТС является вопрос о мере неустойчивости относительного движения системы под действием резонансных явлений. Резонансная неустойчивость радиальной космической тросовой системы (КТС) является следствием того, что частота ее колебаний перпендикулярно к плоскости орбиты близка к удвоенной орбитальной частоте. Это свойство КТС является принципиальным (характерным) свойством сильно протяженных в одном измерении структур: осевой момент инерции несравнимо меньше остальных главных центральных моментов инерции системы. При воздействии на систему

моментов, частота которых близка к удвоенной орбитальной частоте (или кратной ей), в системе может иметь место линейный и/или параметрические резонансы.

Для анализа механизмов возникновения резонансов в движении ЭДКТС, обусловленных моментами амперовых сил, был проведен анализ изменения этих сил при орбитальном движении. Показано, что резонансные воздействия обусловлены изменением концентрации заряженных частиц и изменением напряженности магнитной индукции Земли при орбитальном движении. Построены модели изменения концентрации заряженных частиц и напряженности магнитного поля при движении ЭДКТС. Показано наличие существенной составляющей изменения концентрации по удвоенной частоте орбитального движения.

На рис. 2 показана зависимость спектральной плотности ρ изменения концентрации заряженных частиц от безразмерной «частоты» w/w_0 , где w_0 — частота орбитального вращения, при орбитальном движении ЭДКТС по круговой орбите высотой 650 км с наклоном 60° . Результаты расчетов концентрации, изображенные на рис. 2, проводились согласно Международной справочной модели ионосферы IRI-2007.

Для исследований резонансных режимов движения под действием амперовых моментов

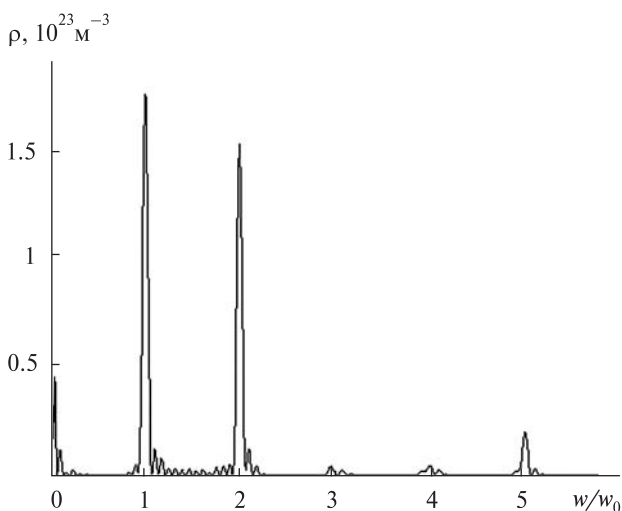


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности ρ изменения концентрации заряженных частиц от изменения w/w_0

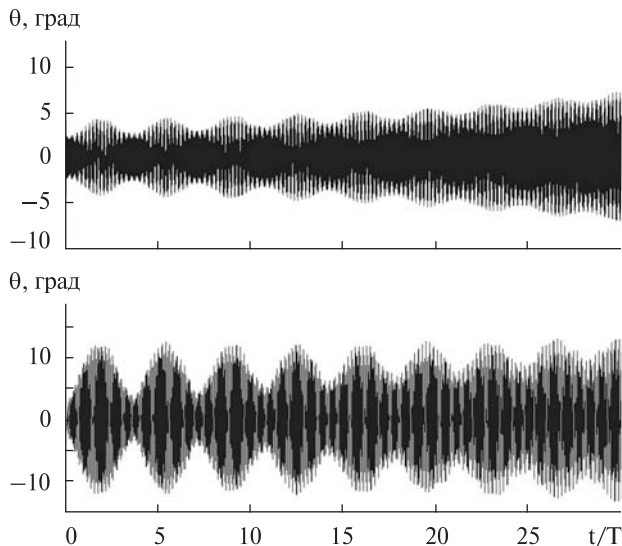


Рис. 3. Изменения во времени углов ориентации

ЭДКТС представлялась в виде гантели, состоящей из двух сферических тел, соединенных невесомой и нерастяжимой связью. На линеаризованных уравнениях движения этой модели были показаны механизмы возникновения резонансов в колебаниях системы перпендикулярно к плоскости орбиты и их связь с колебаниями в плоскости орбиты.

Проведенные моделирования и расчеты резонансных режимов движения позволяют сделать предварительный вывод, что резонансные колебания развиваются достаточно медленно, и ЭДКТС во многих случаях может выполнить свою миссию до наступления колебаний с большой амплитудой. Здесь речь идет как о выполнении задачи натуральных экспериментальных исследований малой ЭДКТС, так и о задаче увода тяжелых объектов с низких околоземных орбит ЭДКТС протяженностью в 10 км.

На рис. 3 показаны результаты расчета изменения углов ориентации ЭДКТС: угла отклонения θ от местной вертикали в плоскости орбиты и угла отклонения φ перпендикулярно к плоскости орбиты. Расчеты проводились при длине троса $L = 5$ км, высоте орбиты 650 км и наклоне 60° . Изменения показаны в безразмерном «времени» t/T , где T — период орбитального движения.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ РАДИАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

При орбитальном движении ЭДКТС изменения плотности атмосферы, как и изменения концентрации заряженных частиц, содержат составляющую с удвоенной орбитальной частотой и кратные ей гармоники. В силу этого в движении радиальной ЭДКТС возможны резонансные движения из-за действия аэродинамического момента.

В рамках рассмотрения движения ЭДКТС как движение гантели получена математическая модель ее динамики относительно центра масс под действием переменного аэродинамического момента. Относительная простота аэродинамических сил в сравнении с амперовыми позволила провести аналитические преобразования уравнений малых колебаний к виду, пригодному для их аналитического исследования.

Для выделенного класса рассматриваемых малых КТС определены диапазоны изменения параметров модели. Показана низкая динамическая жесткость системы к поперечным колебаниям аэродинамического момента при частоте, близкой к удвоенной частоте орбитального движения. Построены аналитические оценки линейного роста амплитуды колебаний КТС перпендикулярно к плоскости орбиты при линейном резонансе. Показано, что в колебаниях вдоль плоскости орбиты резонансы невозможны.

Создан пакет расчетных программ и проведено численное исследование динамики КТС.

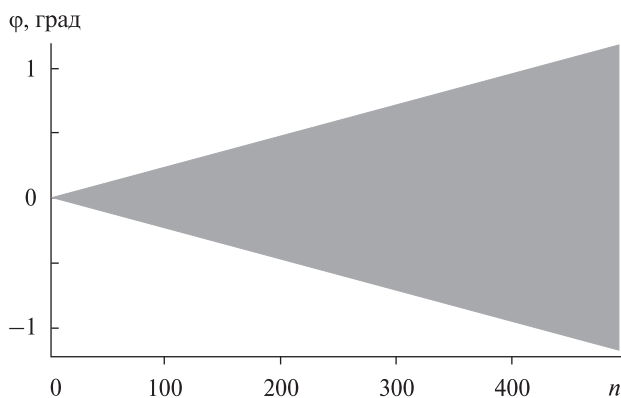


Рис. 4. Аэродинамическая неустойчивость

Предварительные выводы совпадают с выводами при анализе действия амперовых моментов: резонансные колебания развиваются достаточно медленно, и ЭДКТС во многих случаях может выполнить свою миссию до наступления колебаний с большой амплитудой.

На рис. 4 показан рост амплитуды колебаний, перпендикулярных к плоскости орбиты угла φ , за $n = 500$ витков по орбите для длины троса 1 км. Как видно, рост амплитуды весьма незначителен.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДЕСЯТИКИЛОМЕТРОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УВОДА ОБЪЕКТОВ

Для оценки времени выполнения миссии по уводу тяжелых объектов с помощью ЭДКТС была создана простая модель, позволяющая быстро получить эти оценки. В этой модели, в частности, предполагалось, что ЭДКТС представляет собой жесткую гантель постоянной длины; ЭДКТС всегда расположена строго вдоль местной вертикали; электрическое сопротивление среды пренебрежимо мало по сравнению с омическим сопротивлением троса; орбита центра масс всегда близка к круговой.

На основе полученной модели были построены предварительные оценки времени увода верхних ступеней украинских ракет-носителей для ЭДКТС с тросом длиной 10 км, диаметром 2 мм, массой 15 кг. Эти оценки подтверждают пригодность ЭДКТС для выполнения задач увода таких объектов, а также предварительно подтверждают, что резонансные колебания во многих случаях не успевают разрушить работу системы за время выполнения миссии.

1. Мищенко А. В., Пироженко А. В. Анализ модели взаимодействия электродинамических тросовых систем с магнитосферой и ионосферой земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 4. — С. 3—11.
2. Ahedo E., Sanmartin J. R. Analysis of bare-tether systems for deorbiting low-Earth-orbit satellites // J. Spacecraft and Rockets. — 2002. — 39, N 2. — P. 198—205.
3. Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., et al. Dynamics of tethered space systems. — Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. — 223 p.
4. Bombardelli C., Zanutto D., Lorenzini E. Deorbiting performance of bare electrodynamic tethers in inclined orbits //

- J. Guid., Contr. Dynam. — 2013. — **36**, N 5. — P. 1550—1556.
5. Hoyt R. P., Barnes I. M., Voronka N. R., Slostad J. T. The Terminator Tape™: A cost-effective de-orbit module for end-of-life disposal of LEO satellites // Space 2009 Conference, Sept 2009. — 2009. — AIAA Paper 2009-6733. — P. 1—9.
 6. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. — San Diego: Amer. Astronautical Soc., 2007. — 453 p.
 7. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M. Electrodynamic tether applications and constraints // J. Spacecraft and Rockets. — 2010. — **47**, N 3. — P. 442—456.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2014

А. І. Маслова, О. В. Мищенко,
О. В. Пироженко, Д. О. Храмов

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ КОСМІЧНОЇ ТРОСОВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ПРИСТРОЮ ПАСИВНОГО ВІДВЕДЕННЯ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ З НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ ОРБІТ

Коротко викладено основні результати робіт з дослідження динаміки електродинамічних космічних тросових систем. Наведено результати досліджень динаміки

розгортання тросової системи та резонансної нестійкості коливань системи відносно центра мас під дією амперових і аеродинамічних моментів, а також результати оцінок часу виведення космічних об'єктів з низьких навколоземних орбіт з допомогою електродинамічних тросових систем.

Ключові слова: електродинамічна космічна тросова система, розгортання, резонансні коливання.

А. І. Маслова, А. В. Мищенко,
А. В. Пироженко, Д. А. Храмов

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipropetrovsk

RESEARCH OF DYNAMIC REGULARITIES OF ELECTRODYNAMIC SPACE TETHERED SYSTEM AS A POSSIBLE HIGHLY EFFICIENT PASSIVE DEORBIT SYSTEMS FOR SPACE DEBRIS AT THE LOW EARTH ORBITS

The article summarizes the main results of studies on the dynamics of electrodynamic space tethered systems. The results of studies of the deployment dynamics of the tethered systems and resonant oscillation instability about center of mass under the action of Ampere and aerodynamic moments, as well as the assessment of deorbit time of space objects using electrodynamic tethered systems, are reported.

Key words: electrodynamic space tether system, deployment, resonant oscillation.