

ОБ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМОЙ

А.А. Тихонов, А.П. Дериглазов, Л.Ф. Щербакова, А.Б. Яковлев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
a.tikhonov@spbu.ru

Аннотация. Рассматривается электродинамическая тросовая система (ЭДТС) в околоземном космическом пространстве. Изучается проблема стабилизации ЭДТС в положении ориентации троса вдоль местной вертикали. Предлагается способ решения данной проблемы и соответствующее устройство. Для создания дополнительного восстанавливающего момента используются разноименно заряженные коллекторы на концах троса, а для создания активного управляющего момента диссипативного характера используются управляемые электронные эмиттеры, позволяющие изменять величину заряда на одном из коллекторов в соответствии с условиями, определяемыми текущей ориентацией троса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00672.

Введение

Рассматривается космическая тросовая система, включающая проводящий трос, взаимодействующий с магнитным полем Земли, и называемая электродинамической тросовой системой (ЭДТС) [1]. На основании выполненных к настоящему времени теоретических исследований и проведенных испытаний в открытом космосе можно утверждать, что (ЭДТС) перспективны как источники Амперовой силы тяги в околоземном пространстве [1]. В частности, ЭДТС, не требующий расхода топлива, может использоваться для решения актуальной задачи спуска с орбиты отработанных элементов космических систем. Анализ направлений тока, протекающего вдоль троса, и магнитной индукции магнитного поля Земли свидетельствует о том, что наибольшей эффективностью отличается трос, функционирующий в режиме проводника с током, ориентированного в околоземном пространстве вдоль местной вертикали. Для обычного тяжелого троса данная ориентация является устойчивой в центральном ньютоновском гравитационном поле, но для электродинамического троса это, вообще говоря, неверно: под действием момента сил Ампера вертикальная ориентация троса разрушается [1]. Проблема неустойчивости ЭДТС известна и рассматривается специалистами как критически важная. Среди возможных подходов к решению этой проблемы предлагаются различные варианты использования устройств для периодического выключения тока, протекающего по тросу. Однако, в большинстве случаев ЭДТС должна функционировать в условиях, предполагающих непрерывное протекание тока вдоль троса в одном направлении, например, для создания упомянутой выше силы тяги с целью удаления космического мусора или для работы ЭДТС в режиме генератора мощности. Поэтому периодическое выключение тока, протекающего по тросу, или переключение направления тока снижает эффективность ЭДТС и ограничивает возможности их использования.

Основные полученные результаты

Предлагается конструкция ЭДТС, включающая положительно заряженный коллектор на верхнем конце троса и отрицательно заряженный коллектор на нижнем конце [2, 3]. Для модели однородного магнитного поля Земли доказаны существование, единственность и устойчивость положения равновесия троса в натянутом состоянии вдоль местной вертикали [4]. В данной работе учитывается градиентность магнитного поля Земли. На базе нелинейных дифференциальных уравнений колебательного (относительно центра масс) движения натянутого троса показано, что в условиях электрического тока, протекающего по тросу, влияние градиентности магнитного поля Земли приводит к исчезновению строго вертикального равновесного положения троса. Однако, доказано существование равновесного положения электродинамического троса, близкого к вертикальному (Рис. 1), для широкой области изменения параметров троса.

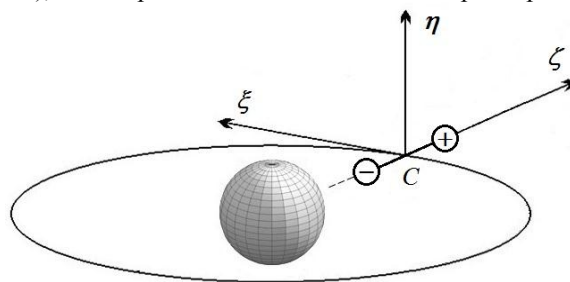


Рис. 1. ЭДТС в номинальном режиме движения в орбитальной системе координат

Получены необходимые условия устойчивости найденного положения равновесия. Подтверждено стабилизирующее влияние коллекторов зарядов, размещенных на концах троса. Проанализирована зависимость сил натяжения троса от параметров ЭДТС. Показано, что найденное положение равновесия может быть использовано в качестве номинального режима ориентации электродинамического троса, предназначенного для уборки космического мусора.

Проанализирована возможность управляемого изменения зарядов на коллекторах при одновременной поддержке нужной величины тока в тросе. Предлагаемая конструкция ЭДТС предполагает процесс сброса заряда с коллектора с помощью электронной пушки или другого устройства. В связи с этим важным элементом исследования функционирования ЭДТС является изучение процесса нейтрализации заряда коллектора при осуществлении сброса заряда с его поверхности. Процесс нейтрализации заряда КА на высотах порядка нескольких сотен километров над поверхностью Земли при инъекции электронного пучка изучался как экспериментально, так и теоретически [5-8]. Измеренные величины потенциала КА в ионосферных экспериментах показали, что даже без использования систем искусственной нейтрализации КА наводимый на поверхности КА электрический заряд не препятствует функционированию систем сброса заряда [7]. Теоретическое исследование процесса нейтрализации КА в ионосфере существенно усложняется необходимостью учета влияния магнитного поля на движение частиц плазмы [5-7]. Предлагаемая конфигурация ЭДТС предполагает, что ток по проводу течет за счет ЭДС, возникающей при движении троса в магнитном поле Земли. Для достижения требуемой разности потенциалов между двумя частями КА необходимо использовать достаточно длинный трос с малым удельным сопротивлением. В настоящей работе сформулирована и решена система нелинейных алгебраических уравнений, включающая два уравнения зарядки частей ЭДТС и уравнение закона Ома для тока в тросе. При этом использованы модели нейтрализации заряда КА, предложенные в [5, 7, 8]. Как показывают результаты [8], вокруг движущегося в ионосфере отрицательно заряженного КА возникает область положительного пространственного заряда, где средняя скорость движения ионов меньше скорости КА. Поэтому положительные ионы рассматривались как моноскоростной поток в системе координат, связанной с КА. Показано, что флуктуации параметров плазмы не влияют на устойчивость функционирования системы. Получены зависимости вариации тока электронного пучка при постоянном токе в тросе и вариации тока в тросе при постоянном токе электронного пучка при изменении параметров окружающей плазмы при движении ЭДТС по круговой орбите в плоскости магнитного экватора.

Таким образом, предложено и обосновано устройство стабилизации ЭДТС, не требующее системы управления силой тока, пропускаемого по тросу, и основанное на разделении зарядов на концах троса и использовании возникающего вследствие этого момента сил Лоренца как дополнительного стабилизирующего момента. Устройство, предложенное в [2, 3], создает восстанавливающий момент, используемый для стабилизации ЭДТС. Однако, для обеспечения асимптотической устойчивости номинального положения троса наряду с восстанавливающим требуется также диссипативный момент, способ реализации которого ранее не рассматривался.

Поэтому в данном докладе рассматривается также новый подход к синтезу активного управляющего момента диссипативного характера и предлагается конструктивная схема соответствующего демпфирующего устройства, позволяющие решить задачу стабилизации ЭДТС в состоянии ориентации вдоль местной вертикали. Показано, что если изменять величину заряда на нижнем коллекторе в соответствии с условиями, определяемыми текущей ориентацией троса, а параметры троса выбирать в соответствии с условиями, учитывающими также влияние возмущающих моментов, то можно обеспечить асимптотическую устойчивость ориентации троса вдоль местной вертикали [9]. Приведены результаты численного моделирования процесса стабилизации троса в вертикальном положении относительного равновесия, подтверждающие работоспособность предложенной конструктивной схемы.

Заключение

Предложено устройство для активного демпфирования колебаний электродинамического троса, позволяющее повысить эффективность и быстродействие системы стабилизации ЭДТС.

Литература

1. В.В. Белецкий, Е.М. Левин Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
2. А.А. Тихонов Патент RU - № 2666610 на изобретение «Устройство стабилизации электродинамической тросовой системы для удаления космического мусора» по заявке № 2017129790, Приоритет 22.08.2017, Дата гос. регистрации в Гос. реестре изобретений РФ 11.09.2018
3. А.А. Тихонов Об одной конструктивной схеме электродинамического троса для расширения возможностей и повышения эффективности решения задачи спуска ИСЗ с орбиты / Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: Сб. тр. X междунар. науч. конф. "ПМТУКТ-2017" Воронеж: Изд-во "Научная книга", 2017. -446 с., С. 347-350.
4. A.A. Tikhonov, L.F. Shcherbakova On Equilibrium Positions and Stabilization of Electrodynamical Tether System in the Orbital Frame // AIP Conference Proceedings 1959, 040023 (2018)
5. L.W. Parker, B.L. Murphy Potential buildup on an electron-emitting ionospheric satellite // J. Geophys. Res., 1967, V. 72, P. 1631-1636.
6. Е.К. Колесников, А.Б. Яковлев Методика расчета напряженности электрического поля, индуцируемого у поверхности

бесконечного цилиндра, покоящегося в бесстолкновительной плазме в однородном магнитном поле, при заданном стоке заряда с его поверхности // Космич. исслед. 1996, Т. 34. С. 666-667.

7. В.А. Федоров Величина электрического потенциала КА при инъекции электронного пучка в ионосфере Земли // Космич. исслед. 2001, Т. 39. С. 454-462.
8. В.А. Федоров Нейтрализация отрицательного электрического заряда ИСЗ ионами ионосферной плазмы // Космич. исслед. 2005, Т. 43. С. 9-18.
9. А.А. Тихонов Заявка № 2018140698 на изобретение «Демпфирующее устройство для стабилизации электродинамической тросовой системы», Приоритет 16.11.2018.