

УДК 629.7.087.22

**А. В. Мищенко, А. В. Пироженко**

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

## **АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ С МАГНИТОСФЕРОЙ И ИОНОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ**

---

*Проаналізовано модель взаємодії електродинамічної космічної тросової системи з іоносферою та магнітосферою Землі. Розглядаються особливості розв'язання рівнянь моделі і їхня залежність від граничних умов на кінцях троса. Обговорюються питання моделювання впливу додаткових контакторів на вольтамперні характеристики електродинамічної космічної тросової системи. Розглядаються завдання подальших досліджень.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Космические тросовые системы (КТС) на протяжении десятков лет рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития космонавтики [2, 14, 21, 22]. В последние годы большое внимание исследователей уделяется электродинамическим КТС (ЭДКТС) и их использованию для создания эффективных средств увода отработавших свой срок космических аппаратов и ступеней ракет-носителей с низких околоземных орбит [13 — 15, 19, 21, 25 — 27]. Применение ЭДКТС для решения этих задач представляется многообещающим и очень выгодным [1, 2, 13, 15, 16, 19, 20, 25 — 27].

Важность задач, для решения которых перспективно использование ЭДКТС, обусловила широкие исследования этого направления. Интенсивные исследования задач функционирования ЭДКТС на низких околоземных орбитах длятся уже более двух десятков лет [2, 14, 15, 21, 22]. Полученные результаты, с одной стороны, подтверждают перспективность ЭДКТС и расширяют возможности ее эффективного применения для различных технических приложений, а с другой — позволяют глубже осознать сложность проблемы.

Создание эффективных ЭДКТС связано с решением сложных взаимосвязанных проблем динамики космических тросовых систем, физики плазмы, электродинамики, механики и физики космического полета, термодинамики. Сложный междисциплинарный характер исследуемых задач, тонкие специфические эффекты, проявляющиеся в ЭДКТС и оказывающие на ее работу существенное влияние, — это те причины, которые, по-видимому, обуславливают не такой быстрый, как первоначально ожидалось, прогресс в разработках. Вместе с тем эти же причины, как представляется, обуславливают красоту и привлекательность задачи создания ЭДКТС.

Если рассматривать проблему увода космического мусора, то основное внимание в исследованиях уделяется гравитационно стабилизированной ЭДКТС [13, 25 — 27]. К настоящему времени в этих исследованиях получено большое количество содержательных результатов. Предложена модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой, и показана эффективность оголенного провода для собирания из ионосферы электронного тока [13, 24, 26]. Показана и экспериментально подтверждена возможность использования полых катодов для замыкания цепи большого тока ЭДКТС [22, 23]. Вместе с тем результаты исследования динамики ЭДКТС показывают неустойчивость ее радиального положения, свя-

занную с резонансами колебаний системы относительно центра масс и действием амперовых [2, 21] и аэродинамических [2, 7] моментов. Эта неустойчивость существенно затрудняет реализацию проекта создания эффективной системы увода на основе радиальной ЭДКТС. Известные предложения по управлению процессами стабилизации углового движения радиальной ЭДКТС не только существенно усложняют техническую реализацию проекта, но и не являются вполне обоснованными. Так, в предложении создания ЭДКТС, в которой усредненный момент амперовых сил равен нулю [25, 27], не учтен резонансный характер колебаний и аэродинамическая неустойчивость. Предложения по стабилизации углового движения за счет управления током в тросе основаны на предположении, что модель собирания тока и прохождения его по тросу известна [21, 25]. Отметим, что в последнее время появился интересный, в определенном плане альтернативный, проект вращающейся ЭДКТС для сбора и увода космического мусора [15] и ([www.star-tech-inc.com/id121.html](http://www.star-tech-inc.com/id121.html)).

К настоящему времени экспериментальная база исследований ЭДКТС достаточно ограничена. Эксперимент TSS-1R показал возможность собирания в ионосфере больших токов [22]. Этот же эксперимент показал некорректность известных на то время моделей взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой. Экспериментальные данные силы тока превысили расчетные в 2–3 раза. Эксперимент PMG показал возможность использования полых катодов для достижения в тросе больших токов [22, 23]. Там же была показана существенная зависимость тока в тросе от концентрации заряженных частиц в окружающей ионосфере. Отсюда с учетом модели [5] или (International Reference Ionosphere: <http://iri.gsfc.nasa.gov/>) изменения концентрации частиц в ионосферной плазме при орбитальном движении ЭДКТС немедленно следует резонансная неустойчивость колебаний троса перпендикулярно к плоскости орбиты. В настоящее время европейскими, японскими, американскими и австралийскими учеными готовится совместный проект космического эксперимента ЭДКТС на ракетном зонде [18]. В этом эксперименте пла-

нируется проверка возможности применения неизолированного троса для ЭДКТС, а также возможности применения модели орбитально ограниченного тока как расчетной.

Представляется, что развитие столь перспективного направления, как ЭДКТС, будет набирать все более широкий характер международных исследований. Эти исследования в первую очередь должны быть направлены на получение достоверных экспериментальных данных. Важными представляются и усилия по преодолению трудностей, связанных с междисциплинарным характером задач.

В работе проводится анализ наиболее распространенной модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферой и магнитосферой Земли. Целью анализа является определение вопросов, требующих дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Авторы считают себя специалистами в динамике космического полета и надеются, что их усилия будут не напрасны для преодоления трудностей, связанных с междисциплинарным характером задач ЭДКТС.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Для описания принципов функционирования ЭДКТС введем правую прямоугольную инерциальную систему координат (ИСК)  $O_3 X_u Y_u Z_u$  с началом в центре масс Земли  $O_3$ , ось  $O_3 Z_u$  направлена по оси вращения Земли, ось  $O_3 X_u$  – в точку весеннего равноденствия.

Рассмотрим движение КТС как однородного проводника по низкой околоземной орбите (рис. 1). Как известно [11], движение в ИСК магнита, среды или самого проводника приводит к движению или перераспределению зарядов в проводнике, обусловленному электродвижущими силами (ЭДС) индукции. В дальнейшем ЭДС индукции, обусловленной вращением Земли как магнита, будем пренебрегать.

Выражение для силы Лоренца, действующей на заряды КТС, запишем в виде [11]

$$\mathbf{F}_л = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

где  $q$  — заряд частицы КТС,  $\mathbf{v}$  — скорость движения заряженных частиц ЭДКТС в ИСК, в пер-

вом приближении примем  $\mathbf{v} = \mathbf{V}_\infty$ ,  $\mathbf{V}_\infty$  — скорость движения центра масс КТС в ИСК,  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_T$  — суммарная напряженность электрического поля,  $\mathbf{E}_0$  — напряженность электрического поля в окружающей среде,  $\mathbf{E}_T$  — напряженность электрического поля, обусловленная зарядами в проводнике,  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля Земли.

Для низкой околоземной орбиты считается [10], что атмосфера полностью увлекается вращением Земли. Тогда можно предположить, что вследствие движения заряженных частиц ионосферы в магнитном поле Земли возникает электрическое поле, напряженность которого в окрестности КТС с большой точностью описывается формулой [19, 21, 25]

$$\mathbf{E}_0 = -\mathbf{v}_{pl} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{v}_{pl} = \boldsymbol{\omega}_E \times \mathbf{R}$  — скорость движения заряженных частиц плазмы в ИСК вследствие вращения Земли,  $\boldsymbol{\omega}_E$  — угловая скорость вращения Земли,  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор центра масс КТС.

Однако это предположение трудно признать оправданным, поскольку напряженность электрического поля в ионосферной плазме определяется другими, гораздо более сложными процессами [4].

Далее будем рассматривать трос как одномерную структуру, распределенную вдоль отрезка прямой. Тогда действие сил Лоренца на заряды проводимости троса определяется проекцией (1) на линию троса.

Под действием на электроны проводимости ЭДКТС силы Лоренца происходит перераспределение зарядов: одна часть КТС приобретает положительный заряд, другая — отрицательный. Если бы ЭДКТС не взаимодействовала с зарядами окружающей плазмы (двигалась в вакууме), то перераспределение зарядов происходило бы до тех пор, пока электрическая составляющая силы Лоренца не уравновесила бы магнитную. Напряженность равновесного электрического поля, обусловленного зарядами в проводнике, в этом случае была бы равной  $E_T = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_x$ , где  $E_T$  — проекция  $\mathbf{E}_T$  на касательную к оси троса  $\mathbf{e}_x$ .

Следует отметить, что здесь идет речь о квазиравновесной напряженности, обусловленной

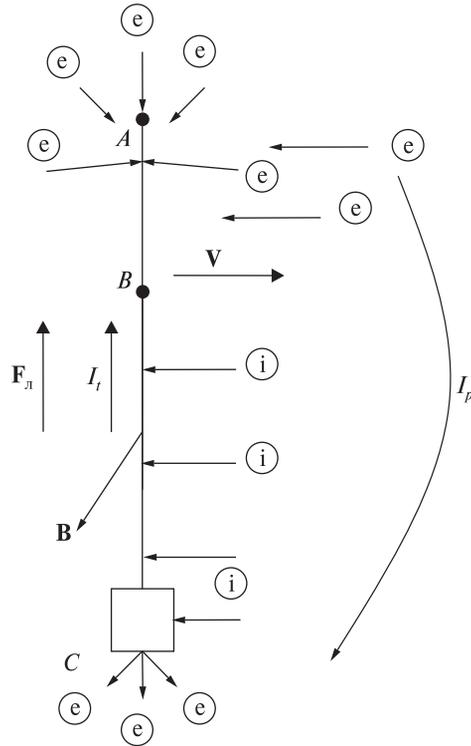


Рис. 1. Схема функционирования электродинамических космических тросовых систем

распределением зарядов. Движение КТС по орбите и ее движение относительно центра масс, вообще говоря, приводило бы, в силу изменений  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{e}_x$ , к перераспределению зарядов в КТС, т. е. возникновению токов. Несмотря на незначительность этих токов, их влияние на эволюцию движения системы могло бы быть существенным, поскольку возникающие при этом силовые воздействия носят диссипативный характер.

Отметим также, что задача расчета распределения на проводнике зарядов, возникающего вследствие действия ЭДС индукции, несмотря на кажущуюся ее простоту, является далеко не тривиальной.

При движении ЭДКТС в ионосфере (состоящей из ионов и электронов) положительная часть системы будет собирать электроны, отрицательная — ионы, и в тросе будет течь ток. На проводник с током, находящийся в магнитном поле Земли, в свою очередь, действует перпен-

дикулярная к тросу сила Лоренца. Если ЭДКТС пересекает магнитные силовые линии перпендикулярно к их направлению (движение в плоскости магнитного экватора), то вся сила направлена на торможение движения. В ином случае возникают силы, направленные перпендикулярно к плоскости орбиты, которые могут быть причиной раскачивания ЭДКТС относительно плоскости орбиты.

### АНАЛИЗ МОДЕЛИ

В настоящее время наиболее перспективными считаются ЭДКТС, имеющие в своей конструкции неизолированные ленту или трос. Неизолированный трос в таких системах играет роль контактора с плазмой (анода), собирающего электроны. Дж. Санмартин [26] показал, что ЭДКТС с оголенным тросом позволяют собирать в плазме большой электронный ток. В системах с изолированным тросом в качестве анода предполагается использовать большие металлические поверхности, при расчете тока на которые необходимо учитывать влияние магнитного поля на электроны ионосферы. Собираемый поверхностью ток в этом случае сокращается магнитным полем Земли почти в два раза [3] по сравнению с током, собираемым той же поверхностью без учета влияния магнитного поля на заряды.

Несмотря на очевидное преимущество для собирания тока, в ЭДКТС с неизолированным тросом действие электродинамической силы неравномерно распределено вдоль троса. Это может привести к раскачиванию системы. В ЭДКТС с изолированным тросом сила тока постоянна вдоль проводника, вследствие чего равномерно вдоль него действие электродинамических сил. Однако массовая несимметричность системы может также привести к ее раскачиванию за счет действия моментов.

Далее будем рассматривать ЭДКТС с неизолированным тросом.

Для построения модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой рассмотрим бесконечно малый отрезок цилиндрического троса  $dx$ , где  $x$  — координата оси троса. Поступающие на этот участок внешние заряды снижают равновесное электрическое поле  $E_r$  проводника.

Вследствие этого под действием ЭДС индукции по нему течет ток. Связь между током и изменением разности потенциалов определяется законом Ома [15]

$$\frac{dU}{dx} = \frac{I(x)}{\sigma A_t} - E_m, \quad (3)$$

где  $U$  можно рассматривать как разность потенциалов между тросом и плазмой,  $I(x)$  — ток, текущий через данную точку троса,  $\sigma$  — электрическая проводимость троса,  $A_t$  — площадь поперечного сечения троса,  $E_m$  — проекция суммарной напряженности внешнего электрического поля и электрического поля, возникающего вследствие действия магнитной составляющей силы Лоренца на заряды проводника. С учетом (2) [19, 21, 25] эта проекция равна

$$E_m = -((\mathbf{V}_\infty - \omega_E \times \mathbf{R}) \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_x$$

Однако с учетом вышеизложенных рассуждений можно принять  $E_m = -(\mathbf{V}_\infty \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_x$ , что соответствует [15, 24, 26, 27].

Собираемый электронный ток рассчитывается на основе зондовой теории для орбитально ограниченного тока [6, 12] для цилиндрических зондов

$$\frac{dI}{dx} = \frac{2p_t j_{oe}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{eU(x)}{kT_e} + 1}, \quad (4)$$

где  $I$  — ток, поступающий с плазмы на зонд,  $p_t$  — периметр поперечного сечения зонда,  $j_{oe} = en\sqrt{kT_e}/(2\pi m_e)$  — плотность теплового электронного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток электронов),  $n$  — концентрация заряженных частиц в невозмущенной плазме,  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл — элементарный заряд электрона,  $T_e$ ,  $m_e$  — температура и масса электрона,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Для расчета собираемого электронного тока для достаточно длинных тросов при больших электрических потенциалах в работах [13, 24, 26] принимается упрощение

$$\frac{dI}{dx} = \frac{enp_t}{\pi} \sqrt{\frac{2eU(x)}{m_e}}. \quad (5)$$

В работе [17] показано, что выражения (4), (5) подходят для расчета тока на цилиндры с ради-

усами, не превышающими дебаевский ( $r_i \leq \lambda_D$ ). Если радиус троса больше дебаевского ( $r_i > \lambda_D$ ), рассчитанные значения тока начинают расходиться с экспериментальными данными.

Собирание ионного тока на отрицательно заряженный участок троса, в соответствии с той же теорией, описывается выражением, аналогичным (5). Для ионного тока выражение, стоящее в правой части, нужно умножить на коэффициент  $\varepsilon_1 = \pi^{-1} \sqrt{m_e / m_i}$ , где  $m_i$  — масса иона. В работах [13, 26] используется коэффициент  $\varepsilon = \sqrt{m_e / m_i}$ , однако следует заметить, что скорость ионов, в отличие от электронов, значительно меньше орбитальной скорости системы. Ионы налетают на трос только с одной стороны, и площадь собирания будет равна не  $2\pi r_i I$ , как для электронов, а  $2r_i I$ , что меньше в  $\pi$  раз. Значит, коэффициент перехода будет равен  $\varepsilon_1 = \pi^{-1} \sqrt{m_e / m_i}$ .

Предполагая, что весь собранный предшествующим участком троса в плазме ток равен току, протекающему через данную точку  $I(x)$ , получим замкнутую систему уравнений (3), (5) для анодной части троса. Для катодной части уравнения аналогичны.

Уравнения (3), (5) являются основной частью общепризнанной модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой. В работах [13, 24, 26] вывод этих уравнений осуществлен с помощью специальной теории относительности. При этом осуществляется переход в систему координат, связанную с тросом, как инерциальную систему координат. Такой подход представляется не совсем удачным. И не только потому, что он очень необычен для специалистов по динамике. Такой подход не учитывает разные скорости электронов и ионов в ионосферной плазме и их качественное отличие от орбитальной скорости КТС. Этот подход требует принять плохо обоснованное предположение о напряженности электрического поля в нейтральной плазме. Кроме того, при всей эквивалентности магнитного и электрического поля в специальной теории относительности, она не описывает различия в изоляции от электрического и магнитного полей. На рис. 2 приведена схема магнитной изо-

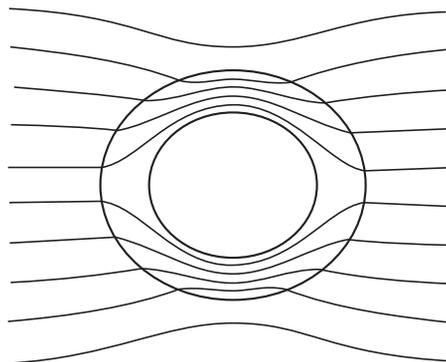


Рис. 2. Схема магнитной изоляции

ляции проводника, взятая из учебника по электродинамике [11]. Представляется, что отсюда следует возможность создания замкнутого контура тока в КТС без взаимодействия с плазмой.

Система уравнений (3), (5) получена в предположении, что ток, проходящий через поперечное сечение троса, в точности равен току, собираемому предшествующим участком троса в плазме. Это предположение эквивалентно предположению, что рассматривается установившийся процесс. Возможность становления такого процесса не обсуждается. Не рассматриваются ни индукционные, ни емкостные свойства ЭДКТС. Вместе с тем собирание ЭДКТС тока в плазме является сложным физическим явлением. Причиной тока в тросе является ЭДС индукции. Заряженные частицы плазмы притягиваются на трос избыточными зарядами троса, величина которых связана с емкостными свойствами троса.

Уравнения (3), (5) для анодной части троса, аналогичные уравнения для катодной части троса (с учетом в уравнении (5) коэффициента перехода  $\varepsilon_1$ ) и граничные условия для тока и (или) потенциала на концах троса составляют модель протекания тока в КТС. Особенностью этой модели является то, что длина анодного и катодного участков троса не фиксирована. Расположение на тросе точки нулевого потенциала  $B$  (см. рис. 1), определяющей границы каждого из участков троса, вычисляется в результате решения уравнений.

Анализ решений рассмотренной модели и их свойств рассмотрен в работах [13, 24–26]. Наиболее полное решение уравнений модели,

на наш взгляд, дано в работе [25]. Далее будем следовать изложенному в работе [25] алгоритму решения.

Для решения системы уравнений (3) и (5) удобнее перейти к безразмерным переменным:

$$i = \frac{I}{I^*}, \quad \varphi = \frac{U}{U^*}, \quad \xi = \frac{x}{L^*}, \quad (6)$$

где  $I^* = E_m \sigma A_T$  — ток «короткого замыкания», т. е. ток, который собирался бы ЭДКТС при идеальном контакте с плазмой;  $U^* = E_m L^*$  — разность потенциалов,  $L^* = \frac{(m_e E_m)^{1/3}}{2^{7/3} e} \left( 3\pi \frac{\sigma h_T}{n} \right)^{2/3}$  — длина троса;  $h_T = \frac{2A_T}{p_T}$  — ширина ленты или радиус троса ЭДКТС.

С учетом (6) уравнения (3) и (5) принимают вид

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = i - 1, \quad (7)$$

$$\frac{di}{d\xi} = \frac{4}{3} \varphi^{1/2}. \quad (8)$$

Для системы (7), (8) легко находится первый интеграл, дающий связь тока и потенциала, который для участков троса можно записать в виде

$$\varphi(i, i_B) = (i_B - i)^{2/3} (2 - i_B - i)^{2/3} \text{ при } \varphi > 0, \quad (9)$$

$$\varphi(i, i_B) = -\frac{1}{\varepsilon_1^{2/3}} (i_B - i)^{2/3} (2 - i_B - i)^{2/3} \text{ при } \varphi < 0, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_1 = \pi^{-1} \sqrt{m_e / m_i}$  — коэффициент перехода,  $i_B$  — безразмерный ток в точке нулевого потенциала  $B$ .

Связь между током и длиной троса находится в параметрическом виде:

$$i(v) = 1 - (1 - i_B) \operatorname{ch} v, \quad (11)$$

$$\xi(v) = \frac{4}{3} (1 - i_B)^{1/3} (f(v_0) - f(v)) \text{ при } \varphi > 0, \quad (12)$$

$$\xi(v) = \frac{4}{3} (1 - i_B)^{1/3} \left( f(v_0) - \frac{f(v)}{\varepsilon^{2/3}} \right) \text{ при } \varphi < 0, \quad (13)$$

где  $v$  — параметр,  $f(v) = \int_0^v \operatorname{sh}^{1/3} v dv$ ,  $v_0 = \operatorname{arch} \frac{1}{1 - i_B}$  — значение  $v$  при  $i = 0$ .

Выражения (12), (13) получаются из (8) при подстановке (11), (9) и (10). Связь между интервалом изменения  $v$  и длиной троса определяет-

ся из уравнения  $\xi(v_m) = l_t$ :

$$l_t = \frac{4}{3} (1 - i_B)^{1/3} \left( f(v_0) - \frac{f(v)}{\varepsilon^{2/3}} \right), \quad (14)$$

где  $v_m$  — значение  $v$  при котором  $\xi(v_m) = l_t$ ;  $l_t = L / L^*$ ;  $L$  — длина троса КТС.

Выражения (9)—(14) дают решение исходных дифференциальных уравнений и позволяют определить значение напряжения и тока в каждой точке троса при заданных граничных условиях на концах троса. Несмотря на аналитическую форму этих выражений, решить их можно только численным путем. Причем решение рассчитывается для конкретных значений параметров плазмы, магнитного поля и КТС, т. е. при исследовании динамики КТС должно рассчитываться на каждом шаге интегрирования. Поскольку рассматривается установившийся процесс, т. е. предполагается, что скорость его установления гораздо выше остальных скоростей, то скорости изменения параметров не учитываются.

На рис. 3 представлено семейство решений (9) и (10) (фазовый портрет решения уравнений модели). Эти решения позволяют судить о распределении вольтамперных характеристик вдоль троса и принимать предположения [25], позволяющие строить упрощенные решения. Конкретное решение 5 системы определяется граничными условиями, изображенными на рис. 3 линиями 2—3, и приведенной длиной троса  $l_t$ . Линией 4 изображена вольтамперная характеристика на катодном конце троса (точке  $C$ ). Это соотношение между током и напряжением должно выполняться для заданной  $l_t$  (выражения (10), (11) для заданной  $v_m$ ).

Оголенный трос позволяет эффективно собирать электроны с плазмы. Поэтому обычно не предполагается наличие дополнительного устройства для сбора электронов на конце анодной части в точке  $A$ . Тогда с большой точностью можно принять, что  $i_A = 0$  (линия 1).

Поскольку пассивное собирание ионов весьма ограничено в сравнении с электронами, то для обеспечения эффективного стекания электронов обратно в плазму обычно предполагается, что на отрицательно заряженном конце ЭДКТС устанавливается плазменный контактор (по-

лый катод) [13, 25, 27]. При идеальном контакте с плазмой разность потенциалов между тросом и плазмой в точке  $C$  равна нулю (линия 3 на рис. 3). Граничные условия для реального полого катода строятся в предположении, что он обеспечит такой ток, что разность потенциалов между катодом и плазмой будет фиксирована. В зависимости от конкретного устройства катода эта разность потенциалов составляет 15...30 В.

При наличии на катодном конце троса полезной нагрузки граничные условия определяются из следующих соотношений. Закон Ома для отрицательно заряженного участка троса запишем в виде

$$E_m(L - L_B) = U_{cc} + Z_t I_c + \int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx, \quad (15)$$

где  $E_m(L - L_B)$  — ЭДС, индуцируемая на катодном участке  $BC$ ,  $U_{cc} = 15...30$  В — разность потенциалов между полым катодом и плазмой,  $Z_t$  — сопротивление нагрузки;  $I_c$  — сила тока, проходящего через точку  $C$ , где находится катод;

$\int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx$  — падение напряжения в тросе ЭДКТС при прохождении тока.

Из выражения (3) следует, что разность потенциалов между тросом и плазмой в точке  $C$  равна

$$U_c = \int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx - E_m(L - L_B). \quad (16)$$

Из (15) и (16) с учетом (6) находится зависимость безразмерного тока  $i_c$  от потенциала  $\varphi_c$  на конце ЭДКТС в точке  $C$ :

$$i_c = -\frac{\varphi_c}{\omega I_t} - \frac{\phi_{cc}}{\omega}, \quad (17)$$

где  $\phi_{cc} = \frac{U_{cc}}{E_m L}$ ,  $\omega = \frac{Z_t \sigma A_t}{L}$  — безразмерные падение напряжения на катоде и сопротивление нагрузки.

На рис. 3 граничное условие (17) выделено штрих-пунктиром (линии 2). При идеальном катодном устройстве (т. е. при  $\phi_{cc} = 0$  и  $\omega = 0$ ) линия граничного условия (17) совпадает с осью  $ou$  или линией  $\varphi_c = 0$  (линии 3). Это значит, что весь трос является анодом, и точка нулевого потенциала точки  $B$  совпадает с концом троса (точка  $C$ ). Такой случай рассматривался в моделях [26, 27].

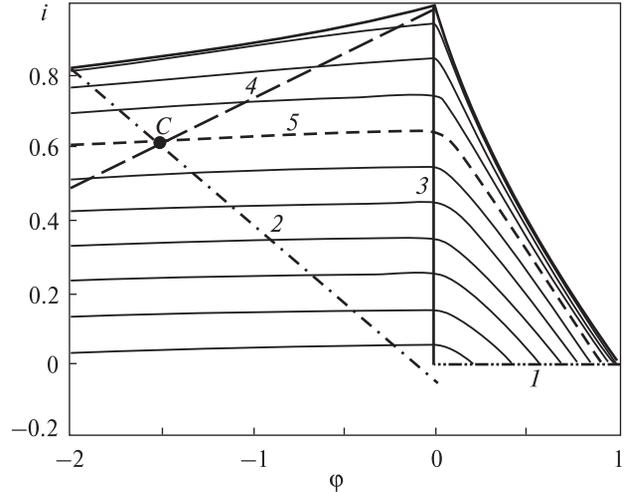


Рис. 3. Фазовый портрет решения уравнений модели [25]: тонкие линии — семейство решений системы (11)—(12), 1 — линия  $i_A = 0$ , 2, 3 — граничные условия, связанные с наличием контакторов с плазмой на концах ЭДКТС, 4 — граничные условия по длине троса ЭДКТС, 5 — решение системы (11) — (12) для конкретной ЭДКТС

Граничное условие (17) с учетом вольтамперной характеристики катодного конца троса для фиксированной  $I_t$  (точка  $C$  на рис. 3) дает решение уравнений модели. На рис. 3 данное решение показано штриховой линией (линии 5). Напомним, что  $I_t$  содержит в себе параметры взаимодействия ЭДКТС с магнитным полем и плазмой.

Моделирование работы полого катода осуществляется в тех же предположениях, что и моделирование работы всей ЭДКТС: предполагается, что имеет место установившийся процесс, скорость установления которого гораздо выше скоростей изменения внешних параметров. Также предполагается, что излучаемые ЭДКТС электроны никак не изменяют концентрацию плазмы. Предполагается, что электроны уходят от ЭДКТС вдоль линий индукции магнитного поля Земли, и электрический контур замыкается на бесконечности. Обоснованность этих предположений с учетом произвольной ориентации скоростей вылета электронов относительно линий индукции магнитного поля и с учетом собственного магнитного поля ЭДКТС не очевидна, и в работах [13, 19, 25—27] не обсуждается. Не рассматривается и вопрос, что будет с полым катодом, если

напряжение на тросе (в точке *C*) будет ниже уровня, фиксированного для данного катода. Важным с точки зрения динамики является вопрос силовых воздействий полого катода на КТС: не будет ли полый катод создавать крутящий момент? Дело в том, что радиальная КТС имеет одноосную гравитационную стабилизацию и практически никак не может противодействовать крутящему вдоль линии троса моменту.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферой и магнитосферой Земли построена на основе ряда не вполне обоснованных предположений. Если учесть, что и модель собирания тока ЭДКТС с ионосферы — модель зондовой теории для орбитально ограниченного тока, требует экспериментального подтверждения, то становится очевидным, что развитие направления ЭДКТС в первую очередь связано с получением достоверных экспериментальных данных функционирования системы в натуральных условиях.

Отметим, что именно резонансная неустойчивость радиальной ЭДКТС заставляет иначе взглянуть на предложенную модель взаимодействия ЭДКТС с магнитосферой и ионосферой Земли. Если бы система была устойчива, то ошибки расчета тока даже в несколько раз не изменили бы пригодности системы для изменения орбит объектов. Однако для реализации проектов радиальной ЭДКТС, в частности проекта увода объектов с орбит, недостаточно получить большой ток, а нужно научиться управлять им.

Эффективность радиальной ЭДКТС во многом будет определяться эффективностью управления стабилизацией ее движения. Несмотря на относительную незначительность моментов, обуславливающих резонансную раскачку пассивной системы, рост амплитуд ее колебаний относительно местной вертикали через определенное время может достигать критической величины, когда растягивающая трос сила становится недостаточной для его распрямления. В этом случае трос начнет сжиматься, образуя петли, увеличится амплитуда колебаний и в итоге ЭДКТС как протяженный проводник перестанет существовать.

Резонансная неустойчивость радиальной 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 вытянутых в одном измерении структур: осевой момент инерции несравнимо меньше остальных главных центральных моментов инерции системы. Таким образом, получается, что для усиления взаимодействия с полями планеты требуется увеличить протяженность космической системы. Но увеличение протяженности приводит к резонансной неустойчивости системы. Здесь, возможно, работает одна из основных тенденций в динамике систем: стремление систем избежать трения [9, 14], т. е. перераспределения энергии в другие ее формы. Возможно, что любая реализация ЭДКТС потребует активного управления ее движением.

Получение экспериментальных данных функционирования ЭДКТС связано со сложной научно-технической задачей создания экспериментальных систем. Экспериментальная ЭДКТС должна обеспечивать достаточно продолжительный устойчивый режим движения и проведение измерений как в полностью пассивном режиме (без дополнительных контакторов), так и при работе полых катодов. Для этого требуется в рамках известных моделей определить закономерности движения ЭДКТС с учетом взаимного влияния динамических и электродинамических характеристик, а также определить влияния параметров системы и внешней среды на функционирование ЭДКТС. Представляется необходимым и более тщательный анализ моделей взаимодействия ЭДКТС с внешней средой, поскольку «вторичные» факторы, такие как фотоэлектронные токи, могут искажать результаты измерений. Это особенно важно для малых экспериментальных ЭДКТС, для которых ЭДС индукции невелика.

Задачи создания экспериментальных ЭДКТС и проведения натуральных экспериментов представляются очень хорошими для привлечения молодежи к научно-техническому творчеству [1, 8, 27]. Эти задачи обладают необходимыми для этого свойствами:

- большая значимость их решения — они возможно откроют путь к созданию нового эффективного транспортного средства для низких околоземных орбит и позволят там решить проблему космического мусора;

- при кажущейся простоте принципов функционирования ЭДКТС эти задачи предполагают и стимулируют разработку многих нерешенных прикладных и фундаментальных проблем науки;

- междисциплинарный характер задач позволит вполне осознать эффективность коллективного творчества и адаптироваться к его сложности.

1. Алпатов А. П., Гребенкин Ф. Н., Мищенко А. В., Пироженко А. В. Электродинамическая тросовая система увода космических аппаратов с орбит: исследование на наноспутниках // Вісник Дніпропетр. ун-ту. — 2006. — № 2/2. — С. 5—10.
2. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. — М.: Наука, 1990. — 329 с.
3. Бойд Р. Зонды Ленгмюра на космическом корабле // Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — С. 506—538.
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
5. ГОСТ 25645.146—89. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. — Введ. 21.11.89. — М., 1989. — 825 с.
6. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
7. Маслова А. И., Пироженко А. В. Пространственное движение КА относительно центра масс с учетом переменности аэродинамического момента // Техническая механика. — 2010. — № 3. — С. 51—62.
8. Мищенко А. В., Пироженко А. В., Шувалов В. А. Взаимодействие электродинамической космической тросовой системы с ионосферной плазмой // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту. — 2007. — № 9/2. — С. 190—196.
9. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 160 с.
10. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г. Н. Дубошина. — М.: Наука, 1976. — 862 с.
11. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1989. — С. 137—151.
12. Шотт Л. Электрические зонды // Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — С. 459—505.
13. 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.
14. 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.
15. Carroll J. A. Space transport development using orbital debris // Final Report on NIAC Phase I. Research Grant N 07600-087. — 2002. — P. 1—43.
16. Estes R. D., Lorenzini E. C., Sanmartin J., et al. Bare tethers for electrodynamic spacecraft propulsion // J. Spacecraft and Rockets. — 2000. — 37. — P. 205—211.
17. Estes R. D., Sanmartin J. R. Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime // J. Phys. Plasmas. — 2000. — 7, N 10. — P. 4320—4325.
18. Fujii H. A., et al. Sounding rocket experiment of bare electrodynamic tether system // J. Acta Astronautica. — 2009. — 64, N 2—3. — P. 313—324.
19. 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. — 2009. — AIAA Paper 2009-6733. — P. 1—9.
20. Johnson L., Carroll J., Estes R. D., et al. Electrodynamic tethers for reboost of the international space station and spacecraft propulsion // AIAA Paper 96-4250. — 1996. — 7 p.
21. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. — San Diego: American Astronautical Soc., 2007. — 453 p.
22. Lorenzini E. C., Cosmo M. L. Tethers in space handbook. — 3rd edition. — Smithsonian Astrophys. Observatory, 1997. — 241 p.
23. McCoy J. E., et al. Plasma motor-generator (PMG) flight experiment results // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 57—85.
24. Samanta Roy R. I., Hastings D. E., Ahedo E. System analysis of electrodynamic tethers // J. Spacecraft and Rockets. — 1992. — 29, N 3. — P. 415—424.
25. Sanjurjo Rivo M. Self balanced bare electrodynamic tethers. Space debris mitigation and other applications: tesis doctoral N 1839. — Madrid, 2009. — 215 с.
26. Sanmartin J. R., Martinez-Sanchez M., Ahedo E. Bare Wire Anodes for Electrodynamic Tethers // J. Propulsion and Power. — 1993. — 9, N 3. — P. 353—360.
27. Tortora P., Somenzi L., Iess L., Licata R. Small mission design for testing in-orbit an electrodynamic tether deorbiting system // J. Spacecraft and Rockets. — 2006. — 43, N 4. — P. 883—892.

Надійшла до редакції 20.05.11

A. V. Mishchenko, A. V. Pirozhenko

#### THE ANALYSIS OF INTERACTION MODEL OF ELECTRODYNAMIC TETHER SYSTEMS WITH THE EARTH'S MAGNETOSPHERE AND AN IONOSPHERE

The model of interaction of electrodynamic space tether systems (EDSTS) with the Earth's ionosphere and magnetosphere is analysed. The features of the equation solution of the model and their dependence on boundary conditions on the cable extremities are considered. Some questions relative to the simulation of the influence of additional contactors on current voltage characteristics of the EDSTS are discussed. Some problems of the further examinations are considered.