

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

DOI: 10.32743/UniTech.2021.88.7.12082

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРОСОВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
С НЕЗАМКНУТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ****Камолов Матвей Сергеевич**

аналитик

Института сравнительных исследований умных городов,

РФ, г. Москва

E-mail: [mathewkamolov@yandex.ru](mailto:mathewkamolov@yandex.ru)**Чепурной Андрей Владимирович**

научный руководитель,

частный преподаватель,

РФ, г. Москва

E-mail: [5073952@mail.ru](mailto:5073952@mail.ru)**ELECTRODYNAMIC TETHER SPACE SYSTEM WITH AN OPEN ELECTRICAL CIRCUIT****Matvey Kamolov**

Analyst,

Institute for Smart Cities Comparative Studies,

Russia, Moscow

**Andrey Chepurnoy**

scientific director,

Private teacher

Russian Federation, Moscow

**АННОТАЦИЯ**

В настоящей научно-исследовательской работе рассматривается возможность использования тросовых электродинамических систем для орбитального движения искусственных спутников. Исследуется движение спутника с электродинамической тросовой системой в магнитном поле Земли при действии силы Ампера. Движитель спутника представляет собой трос, по которому пропускается ток сначала в одну сторону, затем обратно. В классической электродинамической тросовой системе ток протекает по тросу как по участку электрической цепи, которая замкнута через ионосферу Земли. В данной работе замыкания через ионосферу нет, протекающий по проводнику ток имеет переменное направление, но при этом предложено синхронно с изменением направления тока изменять ориентацию тросовой системы в пространстве с тем, чтобы сохранять направление действия силы Ампера. Наше исследование открытых научных источников показывает, что подобная схема в современных разработках не рассматривается. Целью научной статьи является расчёт и оценка параметров тросовой системы и возможности осуществления орбитальных маневров с помощью предложенного устройства. В работе были выведены все параметры предложенной системы, детально проработана модель маневрирования с помощью вращающейся электродинамической тросовой системы в магнитном поле Земли и дана сравнительная оценка предложенной движительной системы.

**ABSTRACT**

In this research work, the possibility of using tether electrodynamic systems for the orbital motion of artificial satellites is studied. The motion of a satellite with an electrodynamic tether system in the Earth's magnetic field under the action of the Ampere force is investigated. The mover of the satellite is a cable through which a current is passed, first in one direction, then backwards. In the classical electrodynamic tether system, the current flows along the tether as in a section of an electrical circuit that is closed through the Earth's ionosphere. In the proposed solution, there is no closure through the ionosphere, the current flowing through the conductor has an alternating direction, thus it is proposed to change the orientation of the cable system in space synchronously with the change in the direction of the current in order to maintain the direction of the Ampere force. Our research of open scientific sources shows that such a scheme is not considered in modern developments. The purpose of the scientific article is to calculate and estimate the parameters of

the tether system and the possibility of carrying out orbital maneuvers using the proposed device. In the paper, all the parameters of the proposed system were derived, a model of maneuvering using a rotating electrodynamic cable system in the Earth's magnetic field was worked out in detail, and a comparative assessment of the proposed propulsion system was given.

**Ключевые слова:** тросовые электродинамические космические системы, орбитальные маневры, магнитное поле Земли.

**Keywords:** tether electrodynamic space systems, orbital maneuvers, Earth's magnetic field.

### Вступление

Одной из важнейших задач прикладных технических наук является уменьшение энергозатрат процессов. В космической отрасли, где используются в основном химические источники энергии огромной мощности, это весьма актуально. Известно, что один килограмм полезной нагрузки требует на два порядка большего количества рабочего тела для вывода на орбиту. Маневры в космосе также энергозатратны. Наряду с разработками новых энергетических установок на реактивной тяге ведутся поиски различных альтернативных методов, использующих природные резервы, такие как магнитное поле, гравитационные силы, ионизированная плазма космического пространства, солнечный свет.

В нашем случае речь идёт о космических системах с гибкой связью. Такие гибкие связи могут стабилизировать полёт космических станций и их элементов, участвовать в маневрировании с переходом на новые орбиты, осуществлении как разгон, так и торможение космического аппарата (КА). Россия имела значимые позиции в области космических тросовых систем до середины 60-х годов прошлого века. К.Э. Циолковский, предложил ещё в 1895 г. вращающийся вокруг космического корабля трос для создания искусственной тяжести и перемещения грузов [1; 2], затем в 1910 г. Ф.А. Цандер выдвинул проект «космического лифта» [3], в 20 – 30 годы Ю.В. Кондратьев [4], а в 60-е годы Ю.Н. Арцутанов предложили проект троса от поверхности Земли до геостационарной орбиты [5].

Электродинамический космический трос – это проводник, обеспечивающий гибкую связь между космическими объектами. Проводящий трос может быть использован в качестве движителя для КА и как генератор электроэнергии (принцип работы таких тросовых систем подробно описан в источнике [6]). Многие принципиальные вопросы динамики тросовых систем, в силу сложности объекта можно исследовать только на основе экспериментальных данных. Эти данные получают в земных условиях, на суборбитальных ракетах и непосредственно на орбите. Только натуральный орбитальный эксперимент позволяет окончательно подтвердить правильность технических решений. Однако проведение экспериментов с тросовыми системами в виду их большой протяженности представляют особую сложность в плановой реализации и повышенную угрозу для функционирования космических аппаратов, с борта которых они осуществляются.

Активизация работ по тросовой системе связана с именами итальянских учёных Дж. Коломбо и М. Гросси. В частности, ими были инициированы проекты «TSS – 1» и «TSS – 2». Первый был частично реализован в 1992 г., когда от корабля «Атлантис»

отводился итальянский привязной спутник фирмы «Aeritalia» на электропроводном тросе длиной 20 км. Привязная система американской фирмы «Martin Marietta» не сработала на полную длину. Проект «TSS-2» со 100-километровым тросом был отменён. В 1996 г. в ходе полёта «Space Shuttle» была сделана попытка повторить проект («TSS-R»). Трос разматывали на всю длину, но он был повреждён и оборвался вместе с итальянским спутником [7].

Электропроводящие тросы занимают особое место в гибких космических системах. На кабель, находящийся в магнитном поле, по которому протекает ток, действует распределенная сила, величина которой определяется законом Ампера. Направление силы, действующей на проводник, определяется правилом левой руки. Токи, измеренные во время миссий TSS, были по меньшей мере в три раза больше, чем предсказывали аналитические модели, и количество вырабатываемой энергии было прямо пропорционально току. В то время, как в эксперименте «Plasma Motor Generation/Proof Of Function» НАСА были получены сотые доли расчётного значения тока [8].

В рассмотренных опытах, в частности, во время полётов Space Shuttle, ток протекал по проводнику как по участку электрической цепи, замкнутой на ионосферу. Очевидно, что работа таких тросовых систем ограничена ионосферой Земли, концентрация частиц в которой сильно убывает уже к высоте 1000 км [9]. Так и появилась идея о создании универсальной электродинамической тросовой движительной системы для КА – «Электродинамической тросовой космической системы с незамкнутой цепью».

В работе рассмотрены все определяющие динамические и электрические параметры предложенной системы. Главным условием расчётов являлись реалистичность и реализуемость значений. Все окончательные параметры были выведены с учётом практических инженерных ограничений. Также в работе было проведено сравнение предложенного движителя со стационарным плазменным двигателем для КА при прочих равных условиях. Одним из важных достоинств данной работы является принципиальная новизна использования силы Ампера.

### Сила ампера

Движитель спутника представляет собой стержень (трос), закреплённый на оси вращения, по которому проходит ток сначала в одну сторону, затем обратно. При этом синхронно с изменением направления тока стержень вращается так, чтобы сохранить направление действия силы Ампера. Переменное

направление тока обеспечивается открытым колебательным контуром, где металлические сферы на концах стержня являются ёмкостями, а в стержень встроена катушка индуктивности.

Заряжается контур источником энергии, расположенным на КА. Ток,  $I$  в колебательном контуре изменяется по синусоидальному закону [10]:

$$I = I_0 \cdot \sin(\omega t), \tag{1}$$

где  $I_0$  – амплитуда колебаний тока в колебательном контуре, А;

$\omega$  – циклическая частота колебаний в контуре  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}}$ ,

$t$  – время, с.

Сила,  $H$ , с которой магнитное поле Земли действует на помещенный в него проводник с током, рассчитывается по формуле [10]:

$$F_A = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \beta, \tag{2}$$

где  $I$  – ток в проводнике, А;

$B$  – модуль индукции магнитного поля, действующего на проводник с током, Тл;

$l$  – длина проводника, м;

$\beta$  – угол между направлениями тока и вектора индукции магнитного поля, рад.

Так как период колебательного контура синхронизирован с периодом вращения, то  $\beta = \omega t$ , и формула силы Ампера приобретает следующий вид:

$$F_A = I_0 \cdot B \cdot L \cdot \sin^2(\omega t) \tag{3}$$

На рисунке 1 отображены основные этапы работы системы (стержень вращается в направлении против часовой стрелки). В положении 1 стержень расположен перпендикулярно магнитным линиям, соответственно, при этом ток и сила Ампера достигают своего максимального за период значения. В положении 2 угол между стержнем и магнитными линиями уменьшается. Уменьшаются сила тока и тяга. В положении 3 ток и сила Ампера равны нулю, так как стержень расположен параллельно магнитным линиям. В этом положении ёмкостные сферы оказываются полностью заряженными. В следующий момент ток начинает движение в обратном направлении. В положении 4 ток и тяга увеличиваются и к положению 5 снова достигают максимального значения. Прошла половина периода вращения и колебаний в контуре. Далее всё повторяется.

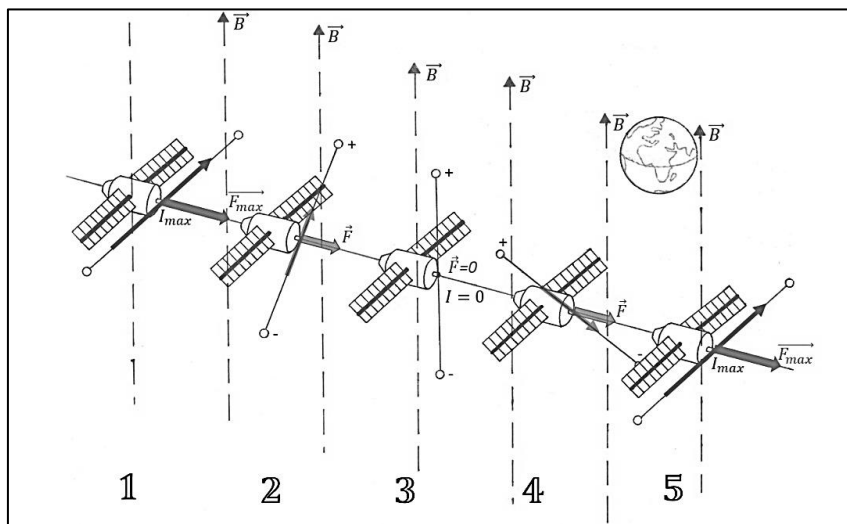


Рисунок 1. Этапы работы движителя

Выведем формулу расчёта среднего значения силы Ампера, проинтегрировав силу Ампера по времени:

$$\overline{F_A} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \cdot B \cdot l \cdot \sin^2(\omega t) \cdot dt = \frac{I_0 \cdot B \cdot l}{2} \tag{4}$$

Чтобы обеспечить наибольшую тягу, надо использовать максимальные ток и длину стержня. При этом ток ограничен условиями тепловыделения и накопления заряда на сфере (подробнее об этих ограничениях в соответствующих разделах). Длина стержня ограничена массогабаритными характеристиками спутника. Исходя из этих условий, длина стержня принята за 10 м, а сила тока за 31,4 А. Увеличить силу можно увеличением количества

стержней, например, до четырёх штук. Так, средняя сила Ампера, действующая на стержень при индукции магнитного поля Земли в  $2,39 \cdot 10^{-5}$  Тл на высоте 600 км равна  $1,5 \cdot 10^{-2}$  Н.

**Магнитное поле земли**

Индукция магнитного поля, Тл земного шара (рис. 2) рассчитывается по формуле [11]:

$$B = \frac{M}{R^3} \cdot \sqrt{1 + 3 \sin^2 \alpha} \tag{5}$$

где  $M$  – магнитный момент Земли, равный  $8,1 \cdot 10^{15}$  Тл·м<sup>3</sup>;

$R$  – расстояние до центра Земли, м;

$\alpha$  – угол между радиус-вектором движения спутника и плоскостью магнитного экватора Земли, рад.

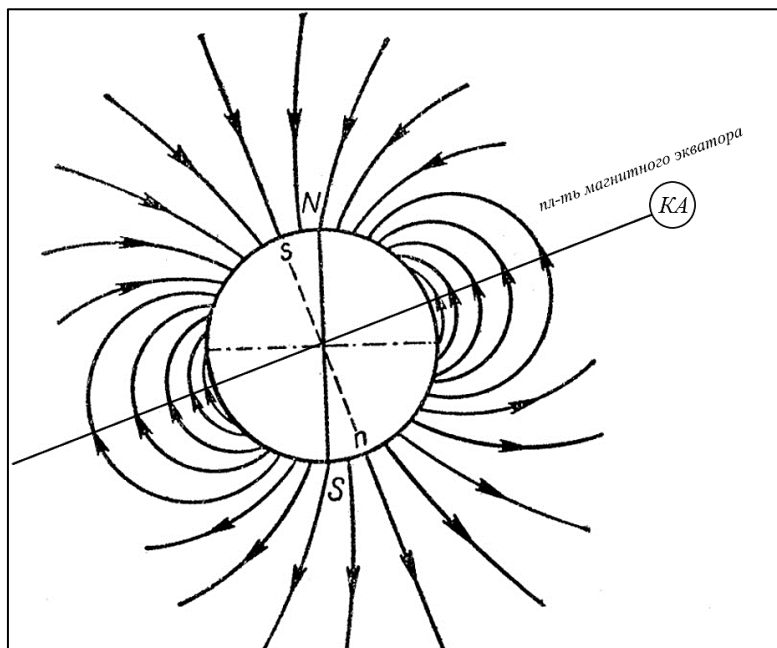


Рисунок 2. Расположение КА

Для упрощения задачи, рассматриваются только круговые орбиты спутника, лежащие в плоскости магнитного экватора ( $\alpha=0$ ). Соответственно, формула приобретает упрощенный вид:

$$B = \frac{M}{R^3} \tag{6}$$

или

$$B = \frac{M}{(R_3+h)^3}, \tag{7}$$

где  $R_3$  – радиус Земли, равный  $6,37 \cdot 10^6$  м [12].

**Индуктивность и ёмкость контура**

Рассчитаем параметры открытого колебательного контура (рис. 3) из условия, что частота электрических колебаний должна равняться частоте вращения стержня  $f$ .

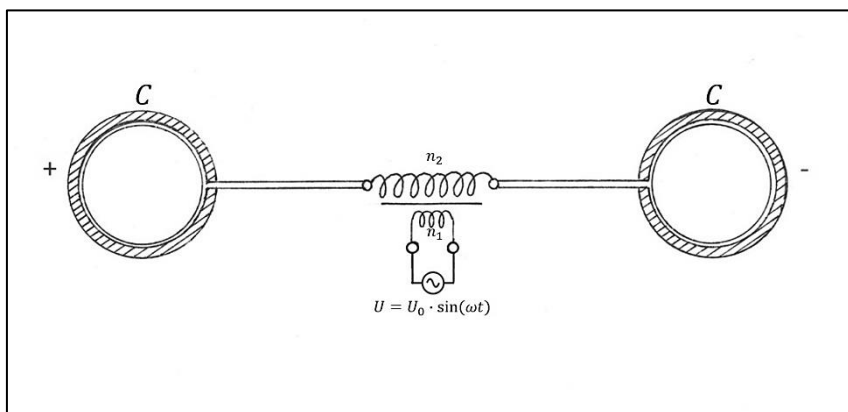


Рисунок 3. Схема колебательного контура

Поскольку частота вращения не может быть слишком большой (например, из соображений прочности и минимизации вибраций), ограничим её значением 10 Гц. Чтобы обеспечить такую низкую частоту колебаний в контуре, необходимо использовать как можно большие значения ёмкости и индуктивности в соответствии с формулой частоты колебаний в контуре, Гц [10]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{8}$$

где  $L$  – индуктивность катушки, Гн;  
 $C$  – ёмкость конденсатора, Ф.

Ёмкость уединенного проводника сферической формы,  $\Phi$  рассчитывается по формуле[10]:

$$C = \frac{\epsilon R_1}{k}, \tag{9}$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость сферического диэлектрика;

$R_1$  – радиус уединённого проводника сферической формы, м;

$k$  – коэффициент пропорциональности, равный  $8,98 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ .

Для увеличения ёмкости конденсатора предложено покрыть металлические сферы диэлектрическим слоем из сегнетоэлектрика титаната бария BaTiO<sub>3</sub>. Титанат бария характеризуется высокими значениями диэлектрической проницаемости; на его основе разработано несколько типов сегнетоэлектрической керамики [13]. Для расчётов примем доступное значение относительной диэлектрической проницаемости в 4000. Размеры ёмкостных сфер движителя также ограничены. Диаметр головного обтекателя носителя «Союз 2.1а» имеет диаметр 4,1 м (технические характеристики приведены в источнике [14]). С учётом с этой характеристики, для расчётов диаметр сферы принят 0,6 м. В соответствии с приведёнными данными  $C = 1,33 \cdot 10^{-7}$  Ф.

Для повышения эффективности в работе колебательного контура используется катушка с тороидальным сердечником (рис. 4). Тороидальные катушки обладают более высоким коэффициентом полезного действия и небольшим рассеянием магнитного поля [15]. Индуктивность катушки с тороидальным сердечником, Гн рассчитывается по формуле [16]:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \mu r}{r_1 + \sqrt{(r_1^2 - r^2)}}, \quad (10)$$

где  $N$  – количество витков катушки контура, шт.;  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ ;  
 $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника катушки;  
 $r_1$  – радиус сердечника катушки, м;  
 $r$  – радиус витков катушки, м.

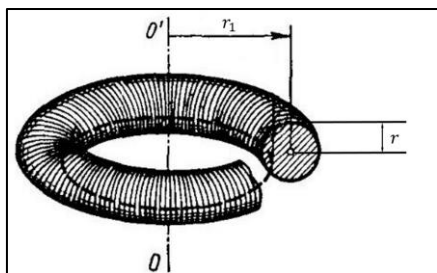


Рисунок 4. Тороидальный сердечник

Чтобы обеспечить приемлемую массу катушки вместе с сердечником, приняты следующие величины размерных параметров:  $r_1 = 0,06$  м,  $r = 0,03$  м. Для увеличения индуктивности в качестве материала сердечника катушки используется сверхмагнетик метглас, магнитная проницаемость которого достигает 1000000 [17]. С помощью формулы частоты колебательного контура найдём недостающее и очень важное значение минимального количества витков в катушке индуктивности:

$$N = \sqrt{\frac{r_1 + \sqrt{(r_1^2 - r^2)}}{\mu_0 \cdot \mu \cdot r \cdot \omega^2 \cdot C}}, \quad (11)$$

где  $r_1$  – радиус сердечника катушки, равный 0,06 м;

$r$  – радиус витков катушки, равный 0,03 м;  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ ;  
 $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника катушки, равная 1000000;  
 $\omega$  – циклическая частота колебаний в контуре, равная  $62,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  
 $C$  – ёмкость конденсатора, равная  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Ф.  
 В соответствии с приведёнными параметрами  $N=75$  витков.

**Сопротивление контура и выделяющаяся тепловая мощность**

Чтобы рассчитать мощность, выделяющуюся при работе системы, необходимо знать полное сопротивление колебательного контура. Оно в свою очередь складывается в основном из сопротивления стержня и провода обмотки катушки. Для минимизации тепловых потерь системы в качестве основного проводящего материала используется медь. Сопротивление контура, Ом рассчитывается по формуле, выведенной из классической формулы электрического сопротивления в проводнике [10];

$$R = \rho_0 \cdot \left( \frac{l}{S_1} + \frac{2\pi r \cdot N}{S_2} \right) \quad (12)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление меди, равное  $1,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  [10];  
 $l$  – длина стержня, равная 10 м;  
 $S_1$  – площадь поперечного сечения стержня, мм<sup>2</sup>;  
 $r$  – радиус витков катушки, равный 0,03 м;  
 $N$  – количество витков катушки, равное 75 витков;  
 $S_2$  – площадь поперечного сечения провода обмотки катушки, мм<sup>2</sup>.

В целях уменьшения сопротивления цепи были приняты следующие размерные параметры с соблюдением общих массогабаритных ограничений:  $S_1 = 6$  мм<sup>2</sup>,  $S_2 = 6$  мм<sup>2</sup>. При этих параметрах  $R = 0,068$  Ом.

Мощность электрической цепи, Вт рассчитывается по формуле [10]:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (13)$$

где  $I$  – ток в электрической цепи, А;  
 $R$  – сопротивление электрической цепи, Ом.

Как уже было сказано, ток в предложенной системе изменяется по синусоидальному закону. В этой связи формула для расчёта среднего значения мощность выводим интегрированием мощности по времени:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0^2 \cdot R \cdot \sin^2(\omega t) \cdot dt = \frac{I_0^2 \cdot R}{2} \quad (14)$$

где  $T$  – период вращения системы, с;  
 $I_0$  – амплитуда колебаний тока в колебательном контуре, А;  
 $R$  – сопротивление колебательного контура, Ом;  
 $\omega$  – циклическая частота колебаний в контуре,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  
 $t$  – время, с.

Выделяющаяся тепловая мощность, как и масса, являются ограничениями для расчётов. Рассчитывая мощность с различными значениями тока и размеров, были подобраны оптимальные характеристики системы, применяющееся во всех расчётах работы. При таких параметрах средняя выделяемая мощность равна 33,7 Вт.

**Заряд на сферах и напряжение на индуктивности**

Для обеспечения подходящего значения амплитуды силы тока в цепи необходимо рассчитать заряд, Кл, проходящий по стержню за половину периода колебательного контура.

$$q = \int_0^{T/2} I_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot dt = \frac{2I_0}{\omega} \tag{15}$$

где  $T$  – период колебательного контура, с;  
 $I_0$  – амплитуда колебаний тока в колебательном контуре, А;  
 $\omega$  – циклическая частота колебаний в контуре,  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}}$ ,  
 $t$  – время, с.

Оценим максимальное значение заряда на сферах, при котором ещё не будет утечки заряда. Предположим, что отрывание электрона происходит, когда сила кулоновского притяжения внешнего электрона к центру атома, и сила его отталкивания всеми электронами заряда сферы становятся равны. Для упрощения, будем считать электронные оболочки атома сферическими. Электрическое поле, создаваемое ими, соответствует полю точечного заряда, помещённого в центр атома. Таким образом, суммарное поле ядра с  $n$  протонов и  $n-1$  электронов равно полю одного протона. Поле всех электронов заряда сферы также равно полю точечного заряда сферы, помещённого в её центр. Сила кулоновского притяжения рассчитывается по формуле [10]:

$$F_1 = k \cdot \frac{e^2}{r_m^2}, \tag{16}$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, равный  $8,99 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ ;  
 $e$  – заряд электрона, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  
 $r_m$  – радиус атома меди, равный  $1,3 \cdot 10^{-10}$  м.

$$F_2 = k \cdot \frac{q \cdot e}{R_1^2}, \tag{17}$$

где  $q$  – заряд сферы, Кл;  
 $R_1$  – радиус сферы, равный 0.3 м.

$$F_1 = F_2$$

$$q = e \cdot \frac{R_1^2}{r_m^2} \approx 1 \text{ Кл} \tag{18}$$

Исходя из рассчитанного максимального заряда сферы, максимальное значение тока для данной частоты вращения 10 Гц оказывается равным 31,4 А.

Зная заряд, получим значение амплитуды напряжения, В в колебательном контуре по формуле [10]:

$$U_0 = \frac{q}{C} \tag{19}$$

где  $q$  – заряд, проходящий по стержню за половину периода колебательного контура, равный 1 Кл;  
 $C$  – ёмкость конденсатора, равная  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Ф.

По расчётам амплитуда напряжения в колебательном контуре равна  $7,5 \cdot 10^6$  В.

**Трансформатор**

Для реализации значения напряжения в колебательном контуре в  $7,5 \cdot 10^6$  В предложено использовать повышающий трансформатор с первичной обмоткой на сердечнике катушки колебательного контура. В первом приближении мощность в первичной обмотке должна быть равна выделяемой мощности. То есть, минимум 33,7 Вт. Важно учесть, что энергия на первичную обмотку подаётся беспроводным способом от аккумулятора, заряжаемого солнечными батареями.

**Суточное изменение орбиты**

Для того чтобы оценить перспективы использования данного движителя, найдем силу сопротивления атмосферы (рис. 5) на высотах от 140 до 1500 км.

Сила лобового сопротивления,  $H$  рассчитывается по формуле[18]:

$$F_c = C_x \cdot \frac{\rho v^2 S}{2} \tag{20}$$

где  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления тела заданной формы при известной ориентации его относительно потока (определяется экспериментально).  $C_x = 1$  для плохо обтекаемого корпуса спутника [19];

$\rho$  – плотность невозмущённой среды;

$v$  – скорость движения тела относительно этой среды;

$S$  – площадь поперечного сечения тела (включая площадь движителя), равная  $4,5 \text{ м}^2$ .

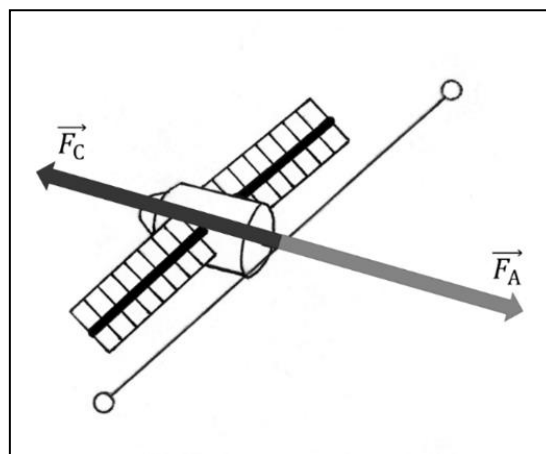


Рисунок 5. Сила Ампера и сила сопротивления

Скорость спутника,  $\frac{m}{c}$  уменьшается с увеличением высоты орбиты в соответствии с формулой [20]:

$$v = R_3 \cdot \sqrt{\frac{g}{R_3+h}}, \quad (21)$$

где  $R_3$  – радиус Земли, равный  $6,37 \cdot 10^6$  м;  
 $g$  – ускорение свободного падения на Земле, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$ ,  
 $h$  – высота орбиты, м.

Равнодействующая силы сопротивления атмосферы и силы Ампера совершает, в зависимости от их соотношения отрицательную или положительную работу, которая уменьшает или увеличивает полную энергию спутника. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению или увеличению радиуса орбиты. Работа, Дж равнодействующей силы рассчитывается по формуле [20]:

$$A = (F_A - F_c) \cdot v \cdot t, \quad (22)$$

где  $F_A$  – сила Ампера, Н;  
 $F_c$  – сила сопротивления атмосферы, Н;  
 $v$  – скорость спутника,  $\frac{m}{c}$ ;  
 $t$  – время полёта, с.

Изменение энергии спутника, Дж рассчитывается по формуле [20]:

$$\Delta E = G \cdot \frac{M_3 \cdot m}{2(R_3+h)^2} \cdot \Delta R = \frac{mg \cdot R_3^2}{2(R_3+h)^2} \cdot \Delta R \quad (23)$$

где  $M_3$  – масса Земли, равная  $5,97 \cdot 10^{24}$  кг [11];

$$m = \frac{\rho_1 \cdot l \cdot S_1}{10^6} + \rho_1 \cdot 4\pi \cdot R_1^2 \cdot d + \frac{\rho_1 \cdot 2\pi \cdot r \cdot N \cdot S_2}{10^6} + \rho_2 \cdot 2\pi^2 \cdot r_1 \cdot r^2 \quad (25)$$

где  $\rho_1$  – плотность материала стержня (меди), равная  $8960 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$l$  – длина стержня, равная 10 м;

$S_1$  – площадь поперечного сечения стержня, равная  $6 \text{ мм}^2$ ;

$R_1$  – радиус уединённого проводника сферической формы, равный 0,3 м;

$d$  – толщина сферы, м;

$r$  – радиус витков катушки, равный 0,03 м;

$N$  – количество витков катушки контура, равное 75 витков;

$S_2$  – площадь поперечного сечения провода обмотки катушки, равная

$\rho_2$  – плотность материала сердечника катушки (метглас), равная  $7330 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  [17];

$r_1$  – радиус сердечника катушки, равный 0,06 м.

Для обеспечения приемлемого значения массы спутника принято значение толщины сфер в 0,0005 м.

$R_3$  – радиус Земли, равный  $6,37 \cdot 10^6$  м;

$m$  – масса спутника, кг;

$h$  – высота орбиты, м.

Таким образом, подставляя выражение для скорости спутника  $v$ , изменение высоты орбиты за время  $t$  составит:

$$\Delta R = 2 \cdot \frac{(F_A - F_c) \cdot (R_3+h)^{1,5} \cdot t}{m \cdot R_3 \cdot \sqrt{g}} \quad (24)$$

Плотность атмосферы  $\rho_A$ ,  $\text{кг/м}^3$ , в диапазоне высот 140-1500 км вычисляются по формуле [21]:

$$\rho_A = \rho_n \cdot K_0 \cdot (1 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4)$$

где  $\rho_n$  – плотность ночной атмосферы,  $\text{кг/м}^3$ ;

$K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$  – коэффициенты, учитывающие изменение плотности атмосферы в зависимости от различных параметров.

Используемая в работе модель плотности атмосферы представлена в аналитическом виде с коэффициентами, заданными таблично в источнике [21]. Коэффициенты модели плотности атмосферы приведены к среднему уровню солнечной активности.

#### Масса

Масса спутника складывается из массы КА и массы всей движительной системы. Массу КА примем 1000 кг. Это средняя масса малых спутников, таких как «Экспресс-МД1» или «KazSat-2» [22; 23]. Масса двигателя в свою очередь складывается из массы стержня, сфер, обмотки катушки и массы сердечника катушки. Масса двигателя рассчитывается по формуле:

Масса четырёх двигателей равна 57 кг. В сумме со вспомогательными конструкциями, обеспечивающими прочность, будем считать массу двигателя равной 100 кг. В результате получаем значения силы сопротивления и изменения высоты орбиты за сутки для спутника массой 1100 кг из которых расчетным путём определяем, что приблизительно на высоте 350 км сила Ампера полностью компенсирует силу сопротивления атмосферы, обеспечивая сколь угодно долгое существование спутника на этой орбите. На больших высотах двигатель позволяет при необходимости увеличивать высоту орбиты.

#### Сравнительный анализ

Сравним двигатель на силе Ампера со стационарным плазменным двигателем (СПД), обеспечивающим примерно такую же тягу, например, СПД-70 (характеристики СПД-70 в источнике [24]):

Таблица 1.

Характеристики СПД-70

Модель	Тяга, мН	Мощность, кВт	Тяговый КПД, %	Ресурс, ч	Масса, кг
СПД – 70	40	0,66	43	3100	2

Скорость струи плазменного двигателя составляет около  $20 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ . При тяге 0,04 Н расход топлива,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$  равен [20]:

$$m = \frac{F}{u} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (26)$$

где  $F$  – тяга СПД-70, равная 0,04 Н.

$u$  – скорость струи плазменного двигателя, примерно равная  $20 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .

За время ресурса двигатель израсходует топлива:

$$M = m \cdot t \approx 22 \text{ кг} \quad (27)$$

где  $t$  – время полёта.

Вместе с топливными баками и дополнительным оборудованием (не считая обеспечивающих энергию солнечных батарей) массу ионного двигателя можно считать приблизительно равной 30 кг. Масса двигателя на силе Ампера вместе с узлом вращения и вспомогательным оборудованием (также без сопутствующих солнечных батарей) можно оценить в пределах 100 кг. Ресурс его работы может быть ограничен только сроком службы узла вращения, аккумуляторов и преобразователей напряжения.

#### Список литературы:

1. Андреев А.В., Хлебникова Н.Н. Космические системы с гибкой связью / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bookree.org/reader?file=1503039>.
2. Арцутанов Ю.Н. В Космос – на электровозе // Комсомольская правда.
3. Большая российская энциклопедия / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/physics/text/2018264>.
4. Большая советская энциклопедия / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://gufo.me/dict/bse/Аэродинамическое\\_сопротивление](https://gufo.me/dict/bse/Аэродинамическое_сопротивление).
5. Бутиков Е.И., Кондратьев А.С. Физика для углубленного изучения 1. Механика / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.booksshare.net/books/physics/butikov-ei/20041/files/fizikadlyauglublennogoizucheniya2004.pdf>.
6. Бутиков Е.И., Кондратьев А.С. Физика для углубленного изучения 2. Электродинамика. Оптика / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eb.arsu.kz:81/pdf/foreign/a05021517.pdf>.
7. ГОСТ Р 25645.166-2004 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200036026>.
8. Ким В. Стационарные плазменные двигатели в России: проблемы и перспективы / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://mai.ru/upload/iblock/d8a/statsionarnye-plazmennye-dvigateli-v-rossii\\_-problemy-i-perspektivy.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/d8a/statsionarnye-plazmennye-dvigateli-v-rossii_-problemy-i-perspektivy.pdf).
9. Кондратюк Ю.В. Завоевание межпланетных пространств / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://az.lib.ru/k/kondratjuk\\_j\\_w/text\\_1929\\_zavoevanie.shtml](http://az.lib.ru/k/kondratjuk_j_w/text_1929_zavoevanie.shtml).
10. Королёв Е.В., Жамалов Р.Р. Аэродинамические сопротивления плохо обтекаемых тел / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/aerodinamicheskoe-soprotivlenie-ploho-obtekaemyh-tel/viewer>.
11. Космический аппарат «KazSat-2» / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=95>.
12. Космический аппарат «Экспресс-МД-1» / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=96>.
13. Курашев С.М. Лабораторная работа № 2-04 «Магнитное поле Земли» / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://misis.ru/files/-/cb24893c56d312e085d6374ff7aad79c/№2-04\\_Магнитное\\_поле\\_Земли.pdf](https://misis.ru/files/-/cb24893c56d312e085d6374ff7aad79c/№2-04_Магнитное_поле_Земли.pdf).
14. Метглас / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metglas.com/distribution-transformer-electrical-steel/>.

#### Заключение

Проведённые расчёты показали техническую реализуемость данной концепции движителя. Полученное значение тяги даже в первоначальной концепции предполагает возможность её технической реализации на конкретных КА. Так, рассмотренный вариант конструкции движителя позволит оставаться КА на орбите высотой 350 км без снижения; на более высоких орбитах – повысить её до геостационарной, а на более низких поспособствует продлению срока службы спутника.

В результате сравнительного анализа были выявлены недостатки и преимущества данного варианта движителя. Предложенная электродинамическая система сильно проигрывает в габаритах, однако в отношении массы проигрыш незначителен в сравнении с маломощными СПД, а в сравнении с мощными СПД и вовсе их опережает. Также выигрыш достигается значительным ресурсом предложенного движителя, ограниченного лишь выходом КА из строя.

Рассмотренный вариант обладает достаточно скромной тягой, которую можно в перспективе повысить на два порядка, путём увеличения радиуса ёмкостных сфер или использования большего количества проводящих стержней, что является отдельным инженерным вызовом.



15. Миссии TSS / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://science.nasa.gov/missions/tss/>.
16. Ракета-носитель «Союз-2» / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/468/>.
17. Романенко А.И. Типы функциональных материалов / ИНХ СО РАН. Новосибирск / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nsc.ru/cmnp/onr/view.php?id=407>.
18. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://4ipho.ru/data/documents/Sivuhin\\_III.pdf](http://4ipho.ru/data/documents/Sivuhin_III.pdf).
19. Справочные данные об объектах Солнечной системы / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mosastro.olimpiada.ru/upload/files/Moscow\\_2016\\_supplementary\\_8-11.pdf](http://mosastro.olimpiada.ru/upload/files/Moscow_2016_supplementary_8-11.pdf).
20. Технический отчет об эксперименте «Plasma Motor Generation/Proof Of Function» / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960002041>.
21. Тульский завод трансформаторов / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tula-transformator.ru/catalog\\_tzt\\_2012.pdf](http://www.tula-transformator.ru/catalog_tzt_2012.pdf).
22. Цандер Ф.А. Перелеты на другие планеты / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikisource.org/wiki/Перелёты\\_на\\_другие\\_планеты\\_\(Цандер\)](https://ru.wikisource.org/wiki/Перелёты_на_другие_планеты_(Цандер)).
23. Циолковский К.Э. Вне Земли / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://znaniya-sila.narod.ru/library/pdf\\_00/ciolk\\_03\\_vne\\_zemli.pdf](http://znaniya-sila.narod.ru/library/pdf_00/ciolk_03_vne_zemli.pdf).
24. Циолковский К.Э. Жизнь в межзвездной среде / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikisource.org/wiki/Жизнь\\_в\\_межзвёздной\\_среде\\_\(Циолковский\)](https://ru.wikisource.org/wiki/Жизнь_в_межзвёздной_среде_(Циолковский)).