

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **201900525** (13) **A2**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки
2020.08.31

(51) Int. Cl. **B64G 1/00** (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2019.11.14

(54) **ДЕМПФИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ
ПРОСТРАНСТВЕ**

(31) **2018140698**

(72) Изобретатель:

(32) **2018.11.16**

Тихонов Алексей Александрович (RU)

(33) **RU**

(74) Представитель:

(71) Заявитель:

Матвеев А.А., Матвеева Т.И., Леонов

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "САНКТ-
ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (СПбГУ) (RU)**

И.Ф. (RU)

(57) Изобретение относится к космической технике и может быть использовано для стабилизации космической тросовой системы в околоземном пространстве. Для функционирования электродинамической тросовой системы в околоземном пространстве в режиме ориентации вдоль местной вертикали размещают коллекторы для сбора зарядов противоположных знаков по концам троса. При взаимодействии зарядов с магнитным полем Земли возникает момент лоренцевых сил, который оказывает ориентирующее действие на трос. Для достижения асимптотически устойчивой ориентации троса вдоль местной вертикали величину заряда на одном из коллекторов изменяют в соответствии с условиями, определяемыми текущей ориентацией троса, а параметры троса выбирают в соответствии с условиями, учитывающими также влияние возмущающих моментов, что позволяет решить задачу стабилизации троса в положении вдоль местной вертикали.

A2

201900525

201900525

A2

ДЕМПФИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Изобретение относится к области космической техники и может быть использовано для стабилизации космической тросовой системы в околоземном пространстве с целью повышения эффективности его функционирования в процессе уборки космического мусора.

Выполненные к настоящему времени теоретические разработки и проведенные испытания в открытом космосе позволяют утверждать, что электродинамические тросовые системы (ЭДТС), включающие проводящие тросы, взаимодействующие с магнитным полем Земли, могут использоваться как источники Амперовой силы тяги в околоземном пространстве [1]. В частности, ЭДТС может использоваться как перспективный источник силы тяги, не требующий расхода топлива, для решения актуальной задачи спуска с орбиты отработанных элементов космических систем [2-11].

Из анализа направлений тока, протекающего вдоль троса, и магнитной индукции магнитного поля Земли следует, что наибольшей эффективностью отличается трос, функционирующий в режиме проводника с током, ориентированного в околоземном пространстве вдоль местной вертикали. Данная ориентация троса является устойчивой в центральном ньютоновском гравитационном поле [1]. Вместе с тем, установлено, что под действием момента сил Ампера вертикальная ориентация троса разрушается [1]. Проблема неустойчивости ЭДТС известна и рассматривается специалистами как критически важная [8, 12]. Решению этой проблемы посвящен ряд работ [2-15], в которых делается вывод о том, что для борьбы с динамической неустойчивостью должно использоваться управление. Среди возможных подходов к ее решению предлагаются различные варианты управления силой тока, протекающего по тросу. Например, в [12, 13] предлагается использовать устройства 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 [2-11] или для работы ЭДТС в режиме генератора мощности [16]. Поэтому общим недостатком упомянутых выше способов управления электродинамическим тросом является периодическое выключение тока, протекающего по тросу, или переключение направления тока, что снижает эффективность ЭДТС и ограничивает возможности их использования.

Известны патенты [17, 18] в которых предложено отказаться от периодического выключения тока, протекающего по тросу, или переключения направления тока, а управляющие сигналы формировать на основе измерений параметров текущего состояния троса и последующих расчетов. Измерения напряжения и силы тока в тросе и, возможно, натяжения троса, используются в [17, 18] для формирования таких вариаций силы тока, которые совпадают со значениями силы тока, индуцированными геомагнитным полем при нежелательных компонентах скорости троса. Кроме того, в соответствии с алгоритмом [17, 18], требуется интегрирование системы дифференциальных уравнений движения ЭДТС для выработки управляющего сигнала на формирование управляющего импульса силы тока. Недостатком подхода [17, 18] является сложность системы управления, вызванная необходимостью выполнения измерений для оценки состояния троса в процессе движения, что в свою очередь снижает ее надежность.

Наиболее близким к заявляемому устройству является патент [19], выбранный в качестве прототипа, не требующий системы управления силой тока, пропускаемого по тросу, а также не требующий устройств для измерения натяжения троса, и предлагающий разделить заряды на концах троса и использовать возникающий вследствие этого момент сил Лоренца как дополнительный стабилизирующий момент. Устройство, предложенное в [19], создает восстанавливающий момент, используемый для стабилизации ЭДТС. Доказаны существование, единственность и устойчивость положения равновесия троса в натянутом состоянии вдоль местной вертикали. Однако, для обеспечения асимптотической устойчивости вертикального положения троса наряду с восстанавливающим требуется также диссипативный момент. Поэтому недостатком подхода [19] является то, что в нем не раскрыт способ реализации диссипативного момента, а численные расчеты выполнены для весьма малого по величине модельного диссипативного момента, реализуемого пассивным способом.

Задача данного изобретения заключается в совершенствовании устройства стабилизации вертикального положения троса, повышении его эффективности (робастности) и быстродействия путем создания активного управляющего момента диссипативного характера. Решение этой задачи позволяет расширить область

применимости ЭДТС, функционирующих в режиме ориентации вдоль местной вертикали.

Техническим результатом заявленного устройства является стабилизация ЭДТС в положении, когда трос вытянут вдоль местной вертикали. Указанный технический результат реализуется заявленным устройством, схема которого поясняется Фиг. 1-2. На Фиг. 1 представлена орбитальная система координат $C\zeta\eta\zeta$, являющаяся базовой системой при решении задачи стабилизации ЭДТС. Точка C является центром масс ЭДТС. В номинальном режиме ось z , направленная вдоль натянутого троса, коллинеарна оси $C\zeta$, направленной вдоль радиуса-вектора точки C относительно притягивающего центра. Оси $C\zeta$ и $C\eta$ направлены соответственно по положительной трансверсали к орбите и по нормали к плоскости орбиты. На Фиг. 2 представлена схема заявленного устройства; на Фиг.3 представлены углы, определяющие ориентацию оси z троса в орбитальной системе координат; на Фиг. 4 представлена граница области существования «косых» положений равновесия ЭДТС; на Фиг. 5-15 представлены результаты численного моделирования процесса стабилизации ЭДТС.

Заявленное устройство поясняется Фиг. 2, на которой 1 – трос; 2 – коллектор положительного заряда, соединенный с концевым телом 3 троса посредством электроизолирующего крепления 4; 5 – электронный эмиттер (не менее, чем один), электрически соединенный с коллектором 2 и расположенный внутри электроизолирующего крепления 4; 6 – концевое тело на противоположном конце троса, соединенное с коллектором отрицательного заряда 7 посредством электроизолирующего крепления 8; 9 – электронный эмиттер (не менее, чем один), электрически соединенный с концевым телом 6 и расположенный внутри электроизолирующего крепления 8; 10 – электроизолирующее крепление, внутри которого расположен электронный эмиттер (не менее, чем один) 11, электрически соединенный с коллектором отрицательного заряда 7; 12 – блок управления, работой эмиттера 11, присоединенный к коллектору отрицательного заряда 7 с помощью электроизолирующего крепления 10; 13 – измерительное устройство, входящее в состав блока управления 12.

Работа заявленного устройства поясняется Фиг. 2. К концам проводящего изолированного троса 1 (Фиг. 2) присоединены коллекторы – устройства для сбора электрических зарядов. Коллектор 2, находящийся на верхнем конце троса (том, который дальше от Земли), с помощью электроизолирующих креплений 4 соединен с концевым телом 3 проводящего троса 1. Коллектор 2 получает положительный заряд, поддерживаемый одним или несколькими электронными эмиттерами (например,

полевыми электронными эмиттерами, холодными электронными эмиттерами на основе нанопористого углерода, или холловскими ионными источниками) 5, передающими отрицательный заряд на концевое тело 3. На противоположном конце троса (том, который ближе к Земле) концевое тело 6 соединено с коллектором 7 посредством электроизолирующего крепления 8. Коллектор 7 получает отрицательный заряд, поддерживаемый одним или несколькими электронными эмиттерами 9, передающими отрицательный заряд с концевого тела 6. В соответствии с алгоритмом управления коллектор 7 отдает часть отрицательного заряда в околоземное пространство с помощью электронных эмиттеров 11 на основании управляющих сигналов, вырабатываемых блоком управления 12, включающим измерительное устройство 13 для измерения угла отклонения троса от вертикали и производной этого угла по времени, а также счетно-решающее и управляющее устройства.

Технический результат, достигаемый заявляемым изобретением, состоит в совершенствовании устройства стабилизации вертикального положения троса, повышении его эффективности (робастности) и быстродействия.

Указанный технический результат достигается тем, что размещение положительно заряженного коллектора 2 (Фиг. 2) на верхнем конце троса 1 (Фиг. 2) и отрицательно заряженного коллектора 7 (Фиг. 2) на нижнем конце троса приводит к возбуждению момента сил Лоренца, воздействующих на коллекторы, и оказывающего ориентирующее действие на трос, а изменение величины заряда на нижнем конце троса в соответствии с текущим значением ϑ угла отклонения троса от вертикали и производной $\dot{\vartheta}$ от этого угла по времени приводит к возбуждению момента, имеющего диссипативный характер. При выполнении условий на параметры ЭДТС, указанные моменты обеспечивают существование и асимптотическую устойчивость вертикального положения равновесия троса и решают задачу стабилизации троса в этом положении.

Работоспособность заявленного устройства обеспечивается источниками электроэнергии, преобразованной из световой с помощью солнечных батарей, входящих в состав ЭДТС (на Фиг. 2 не показаны ввиду их известности и широкого использования). Источники электроэнергии обеспечивают работу эмиттеров по поддержанию зарядов на коллекторах и предотвращению разрядки коллекторов в процессе движения через плазму околоземного пространства.

Сущность заявленного изобретения заключается в следующем. Для ЭДТС, центр масс которой (точка C) движется со скоростью \vec{v}_C относительно магнитного поля Земли (МПЗ), характеризуемого магнитной индукцией \vec{B} , накопление электростатических зарядов q_1 и q_2 на коллекторах ЭДТС, приводит к возникновению момента \vec{M}_L лоренцевых сил, определяемого по формуле [21]

$$\vec{M}_L = \vec{P} \times \mathbf{A}^T (\vec{v}_C \times \vec{B}), \quad (1)$$

оказывающего при определенных условиях ориентирующее воздействие на ЭДТС и используемого в качестве восстанавливающего момента наряду с гравитационным моментом [20].

В данном случае, тела, присоединенные к концам троса, считаются точечными, а их вращательным движением можно пренебречь ввиду малости отношения характерного размера тела к длине троса. Упругие деформации троса также не рассматриваются. Трос считается натянутым вдоль оси z с ортом \vec{k} , а его либрационное движение относительно центра масс не влияет на его орбитальное движение. При сделанных предположениях $\vec{P} = (q_1 z_1 + q_2 z_2) \vec{k}$, $\vec{v}_C = R(\omega_0 - \omega_E) \vec{\xi}_0$, где z_1 – расстояние от центра масс системы до центра масс грузов, присоединенных к тросу на нижнем конце, z_2 – расстояние от центра масс системы до центра масс грузов, присоединенных к тросу на верхнем конце, ω_0 – орбитальная угловая скорость центра масс ЭДТС, ω_E – угловая скорость суточного вращения Земли, R – радиус орбиты центра масс ЭДТС. В условиях моделирования МПЗ прямым магнитным диполем $\vec{B} = -g_1^0 (R_E/R)^3 \vec{\eta}_0$, где $g_1^0 = -29556.8$ нТл – гауссов коэффициент, R_E – средний радиус Земли.

Анализ математической модели ЭДТС позволяет получить условия, при которых достигается режим стабилизированного движения ЭДТС. Установлено (подробнее – в Приложении), что существование, единственность и асимптотическая устойчивость положения равновесия троса длиной l в натянутом состоянии вдоль местной вертикали обеспечивается выбором таких параметров троса и присоединенных к нему вышеупомянутых масс, для которых расстояния от центра масс системы до центров заряженных коллекторов одинаковы и выполняется неравенство

$$\frac{R_E^3 |g_1^0| (\omega_0 - \omega_E)(q_{20} - q_{10})}{4l R^2 \omega_0^2 (m_2 + m_0 / 6)} > 1, \quad (2)$$

где l – длина троса, m_0 – масса троса, m_2 – масса грузов, присоединенных к тросу на верхнем конце, q_{20} – постоянная часть заряда на верхнем коллекторе ЭДТС, q_{10} – постоянная часть заряда на нижнем коллекторе ЭДТС. Общий заряд на нижнем коллекторе складывается из постоянной части q_{10} и переменной (управляемой) части \tilde{q}_1 , определяемой по формуле $\tilde{q}_1 = -k_q \tilde{q}_2$, где \tilde{q}_2 – небольшая, вообще говоря, переменная часть заряда на верхнем коллекторе 2, а коэффициент k_q изменяется по закону $k_q = \frac{2d}{lq_2} \dot{\vartheta} \cdot \text{sign} \vartheta - 1$, причем параметр d принимает значения $\begin{cases} d > 0 \text{ при } \dot{\vartheta} > 0 \\ d = 0 \text{ при } \dot{\vartheta} \leq 0 \end{cases}$

Заявленное изобретение апробировано компьютерным моделированием на базе математико-механического факультета заявителя – Санкт-Петербургского государственного университета. Примеры апробации приведены ниже.

Пример 1. Вначале был выполнен численный анализ неравенства (2) для множества ЭДТС со следующими значениями радиуса орбиты и электростатических параметров: $R = 7 \cdot 10^6$ м, $q_{10} = -5 \cdot 10^{-2}$ Кл, $q_{20} = 5 \cdot 10^{-2}$ Кл. Результат приведен на Фиг. 4, где по горизонтальной оси отложены значения $m_2 + m_0/6$ (кг), а по вертикальной – значения l (м). Если длины и массы таковы, что изображающая точка лежит ниже кривой на графике, то неравенство (2) выполняется. Например, пусть $l = 100$ м, погонная масса троса $\gamma = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/м, $m_1 = m_2 = 30$ кг. Тогда неравенство (2) выполнено. Пример подтверждает выполнимость неравенства (2) для обширного множества в пространстве параметров ЭДТС.

Пример 2. Выполнена серия численных экспериментов, моделирующих процесс стабилизации ЭДТС в режиме вертикального расположения троса. Для иллюстрации численного моделирования процесса стабилизации выбран пример конструкции ЭДТС, содержащей трос длиной 200 м, обладающий погонной массой $\gamma = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/м и проводящий ток $I = 2$ А. Масса на нижнем конце троса $m_1 = 55$ кг, масса на верхнем конце троса $m_2 = 50$ кг. Центр заряда коллектора на нижнем конце троса имеет координату $z_1 = -95$ м, центр заряда коллектора на верхнем конце троса имеет координату $z_2 = 105$ м. Центр масс ЭДТС движется по круговой экваториальной орбите радиуса $R = 7 \cdot 10^6$ м.

Фиг. 5-8 иллюстрируют движение ЭДТС с нулевыми зарядами на коллекторах (система стабилизации не работает). В начальный момент времени трос был отклонен от местной вертикали на угол 1 рад в плоскости (η, ζ) и отпущен без начальной угловой скорости относительно орбитальной системы координат. Вертикальное положение

троса оказывается неустойчивым, что наглядно демонстрируется поведением направляющего косинуса γ_3 (Фиг. 5), отклоняющегося с течением времени от целевого значения $\gamma_3 = 1$ под действием Амперова момента, а также поведением модуля ортогональной к тросу составляющей его относительной угловой скорости, отнесенной к орбитальной угловой скорости (Фиг. 6). Здесь и далее на всех рисунках по горизонтальной оси откладывается безразмерный угол – аргумент широты $u = \omega_0 t$. Заметим, что во все время движения величина возмущающего Амперова момента остается малой (Фиг. 7) – на 2 порядка меньше величины гравитационного момента (Фиг. 8), стремящегося стабилизировать ЭДТС вдоль местной вертикали. Модельный диссипативный момент $\vec{M}_D = -hJ\omega_0\vec{\omega}'$, взятый в точности в том виде, который был ранее предложен в [19] (J – тензор инерции ЭДТС) с безразмерным малым параметром $h = 0.001$, изменяясь со временем, качественно повторяет кривую на графике Фиг. 6 и принимает значения в пределах от 0.0005 Н до 0.0025 Н, то есть во все время движения он остается по величине на порядок меньше возмущающего Амперова момента и не способен ликвидировать неустойчивость вертикального положения троса.

Фиг. 9-10 иллюстрируют движение ЭДТС с ненулевыми зарядами на коллекторах ($q_1 = -0.05$ Кл, $q_2 = 0.05$ Кл) в соответствии с подходом, предложенным в [19]. Все остальные параметры ЭДТС и начальные условия ее движения сохранены без изменений, как в случае Фиг. 5-8, соответствующих нулевыми зарядам на коллекторах. Результаты численного интегрирования (совпадающие с соответствующими результатами из [19]), показывают, что направляющий косинус γ_3 медленно стремится к целевому значению $\gamma_3 = 1$ (Фиг. 9), а модуль ортогональной к тросу составляющей его относительной угловой скорости, отнесенной к орбитальной угловой скорости, стремится к нулю (Фиг. 10).

Фиг. 11-15 иллюстрируют движение ЭДТС с системой активного демпфирования колебаний троса в соответствии с заявленным изобретением. Как и в предыдущих случаях, в начальный момент времени трос был отклонен от местной вертикали на угол 1 рад в плоскости (η, ζ) и опущен без начальной угловой скорости относительно орбитальной системы координат. Результаты численного интегрирования показывают, что направляющий косинус γ_3 стремится к целевому значению $\gamma_3 = 1$ (Фиг. 11) на порядок быстрее, чем при отсутствии активного демпфирования (Фиг. 9), а модуль ортогональной к тросу составляющей его относительной угловой скорости,

отнесенной к орбитальной угловой скорости, стремится к нулю (Фиг. 12) на порядок быстрее, чем при отсутствии активного демпфирования (Фиг. 10).

Заметим, что во все время движения величина управляющего диссипативного момента остается малой (Фиг. 13) – на порядок меньше величины восстанавливающего лоренцева момента (Фиг. 14), стремящегося стабилизировать ЭДТС вдоль местной вертикали. Такое соотношение величин восстанавливающего и демпфирующего моментов согласуется с необходимостью поддержания отрицательного заряда на нижнем конце троса. Численный расчет значения q_1 в режиме управляемого движения ЭДТС подтверждает, что заряд q_1 остается отрицательным во все время движения (Фиг. 15) и, с течением времени, по мере стабилизации вертикального положения троса, стремится к стационарному значению $-3 \cdot 10^{-2}$ Кл.

Заметим также, что в рассмотренных примерах численного моделирования выбраны «худшие» значения параметров ЭДТС, для которых условие (2) не выполняется. Более того, не выполняется даже соотношение $z_1 = -z_2$, что позволяет рассматривать Амперов момент как постоянно действующее возмущение, естественным образом возникающее в данной задаче. Сравнение графиков, приведенных на Фиг. 9 и Фиг. 11, а также Фиг. 10 и Фиг. 12, свидетельствует о том, что включение заявляемого демпфирующего устройства, обеспечивающего создание активного управляющего момента диссипативного характера, в состав системы стабилизации ЭДТС позволяет повысить эффективность (робастность) и быстродействие системы по сравнению с прототипом и, тем самым, усовершенствовать устройство стабилизации вертикального положения троса. Решение этой задачи, в свою очередь, позволяет расширить область применимости ЭДТС, функционирующих в режиме ориентации вдоль местной вертикали.

Как показали приведенные выше примеры, компьютерное моделирование процессов стабилизации ЭДТС в режиме вертикального расположения троса, аналитические исследования и численные эксперименты, заявленное устройство может генерировать активным образом управляющий момент диссипативного характера, что повышает эффективность (робастность) и быстродействие системы стабилизации по сравнению с прототипом, а также позволяет работать системе ЭДТС в режиме отсутствия управления силой тока, пропускаемого по тросу, что повышает эффективность работы самой ЭДТС. При этом заявленное устройство, как показал пример 2, позволяет обеспечить асимптотическую устойчивость вертикального положения троса за счет эффективно реализованной возможности разделения зарядов

на концах троса и активному управлению зарядом на нижнем коллекторе путем использования возникающего вследствие этого момента сил Лоренца как управляющего стабилизирующего момента. Все это позволяет эффективнее по сравнению с аналогами обеспечить номинальный режим движения ЭДТС для удаления космического мусора.

Список использованной литературы:

1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М., Наука, 1990, 336 с.
2. Forward R.L. Electrodynamic drag terminator tether, Appendix K of high strength-to-weight tapered Hoytether for LEO to GEO payload transport, Final Report on NASA SBIR Phase I Contract NAS8-40690, 10 July 1996.
3. Forward R.L., Hoyt R.P., Uphoff C. Application of the Terminator Tether™ electrodynamic drag technology to the deorbit of constellation spacecraft, Paper AIAA 98-3491, 34th Joint Propulsion Conference and Exhibition, Cleveland, OH, July 13-15, 1998.
4. Forward R.L., Hoyt R.P. Terminator Tether™: a spacecraft deorbit device, Journal of Spacecraft and Rockets 37 (2000) 187-196.
5. Cosmo M.L., Lorenzini E.C. (Eds.) Tethers in Space Handbook, 3-rd ed., Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA, USA, 1997.
6. Forward R.L. et.al. Electrodynamic tether and method of use, U.S. Pat. No. 6,116,544, Sep. 12, 2000.
7. Vannaroni G., Dobrowolny M., De Venuto F. Deorbiting with electrodynamic tethers: comparison between different tether configurations, Space Debris 1 (2001) 159-172.
8. Iess L., Bruno C. et al. Satellite de-orbiting by means of electrodynamic tethers part I: general concepts and requirements, Acta Astronautica 50 (2002) 399-406.
9. Iess L., Bruno C. et al. Satellite deorbiting by means of electrodynamic tethers Part II: system configuration and performance, Acta Astronautica 50 (2002) 407-416.
10. Ishige Y., Kawamoto S., Kibe S. Study on electrodynamic tether system for space debris removal, Acta Astronautica 55 (2004) 917-929.
11. Yamaigiwa Y., Hiragi E., Kishimoto T. Dynamic behavior of electrodynamic tether deorbit system on elliptical orbit and its control by Lorentz force, Aerospace Science and Technology 9 (2005) 366-373.
12. Zhong R., Zhu Z.H. Libration dynamics and stability of electrodynamic tethers in satellite deorbit, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy 116 (2013) 279-298.
13. Corsi J., Iess L. Stability and control of electrodynamic tethers for de-orbiting applications, Acta Astronautica 48 (2001) 491-501.
14. Pelaez J., Ruiz M., Lopez-Rebollal O., Lorenzini E.C., Cosmo M. A two bar model for the dynamics and stability of electrodynamic tethers, Journal of Guidance, Control and Dynamics 25 (2002) 1125-1135.
15. Larsen M.B., Blanke M. Passivity-based control of a rigid electrodynamic tether, Journal of Guidance, Control, and Dynamics 34 (2011) 118-127.
16. Roberts et al. Tether power generator for Earth orbiting satellites, U.S. Pat. No. 4,923,151 B1, Mar. 1, 1998.
17. Levin E.M., Carroll J.A. Apparatus for observing and stabilizing electrodynamic tethers, U.S. Pat. No. 6,755,377 B1, Jun. 29, 2004.
18. Levin E.M., Carroll J.A. Method for observing and stabilizing electrodynamic tethers, U.S. Pat. No. 6,758,443 B1, Jul. 6, 2004.

19. Тихонов А.А. Патент RU - № 2666610 на изобретение «Устройство стабилизации электродинамической тросовой системы для удаления космического мусора», Приоритет 22.08.2017, Дата гос. регистрации в Гос. реестре изобретений РФ 11.09.2018. – (прототип)
20. Белецкий В.В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. М., изд. Моск. ун-та, 1975. 308 с.
21. Петров К.Г., Тихонов А.А. Момент сил Лоренца, действующих на заряженный спутник в магнитном поле Земли. Ч.2: Вычисление момента и оценки его составляющих // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер.1. 1999. Вып. 3 (№. 15). С. 81-91.

Формула изобретения

1. Демпфирующее устройство для стабилизации электродинамической тросовой системы в околоземном пространстве, содержащее проводящий электроизолированный трос, один конец троса снабжен коллектором положительно заряженных частиц, соединенным с концевым телом троса через электроизолятор, внутри которого расположен не менее, чем один электронный эмиттер, генерирующий электронный пучок с коллектора положительно заряженных частиц, второй конец изолированного троса снабжен коллектором отрицательно заряженных частиц, соединенным с концевым телом троса через электроизолятор, внутри которого расположен не менее, чем один электронный эмиттер, генерирующий электронный пучок с концевой части троса, *отличающееся тем, что* коллектор отрицательно заряженных частиц снабжен электроизолятором цилиндрической формы, внутри которого расположен не менее, чем один электронный эмиттер, а с внешней стороны электроизолятора расположен блок управления работой эмиттера, при этом блок управления содержит измерительное устройство для измерения угла отклонения троса от вертикали, а отрицательно заряженный коллектор имеет управляемый заряд с величиной q_1 , где:

$$q_1 = q_{10} - k_q \tilde{q}_2 < 0,$$

$$\begin{cases} k_q = \frac{2d}{lq_2} \dot{\vartheta} \cdot \text{sign} \vartheta - 1 & \text{при } \dot{\vartheta} > 0 \\ k_q = -1 & \text{при } \dot{\vartheta} \leq 0 \end{cases}$$

ϑ — угол отклонения троса от вертикали,

$\dot{\vartheta}$ — производная угла ϑ по времени,

q_{10} — постоянная часть заряда на отрицательно заряженном коллекторе,

\tilde{q}_2 — небольшая часть заряда q_2 на положительно заряженном коллекторе,

d — положительная постоянная величина, выбор q_{10} , \tilde{q}_2 и d не нарушает

неравенство $q_1 < 0$,

l — длина троса.

2. Демпфирующее устройство для стабилизации электродинамической тросовой системы в околоземном пространстве по п. 1, отличающееся тем, что расстояния от

центра масс системы до центров заряженных коллекторов одинаковы, а длина троса и заряды коллекторов соответствуют неравенству:

$$\frac{R_E^3 |g_1^0| (\omega_0 - \omega_E)(q_{20} - q_{10})}{4lR^2\omega_0^2(m_2 + m_0/6)} > 1,$$

где m_0 — масса троса,

m_2 — масса положительно заряженного коллектора с присоединенными к нему электроизолятором и концевым телом троса,

q_{20} — постоянная часть заряда на положительно заряженном коллекторе,

R_E — средний радиус Земли,

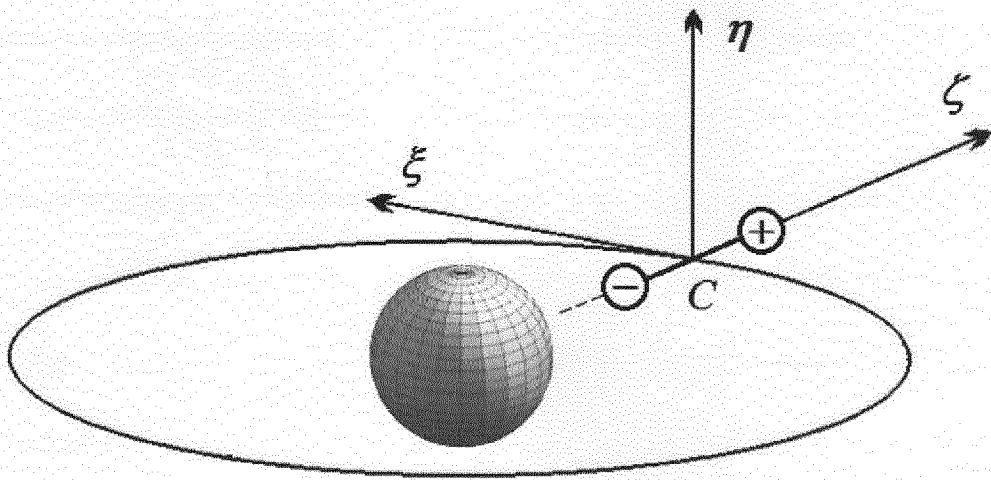
$g_1^0 = -29556.8$ нТл — гауссов коэффициент,

ω_0 — орбитальная угловая скорость центра масс,

ω_E — угловая скорость суточного вращения Земли,

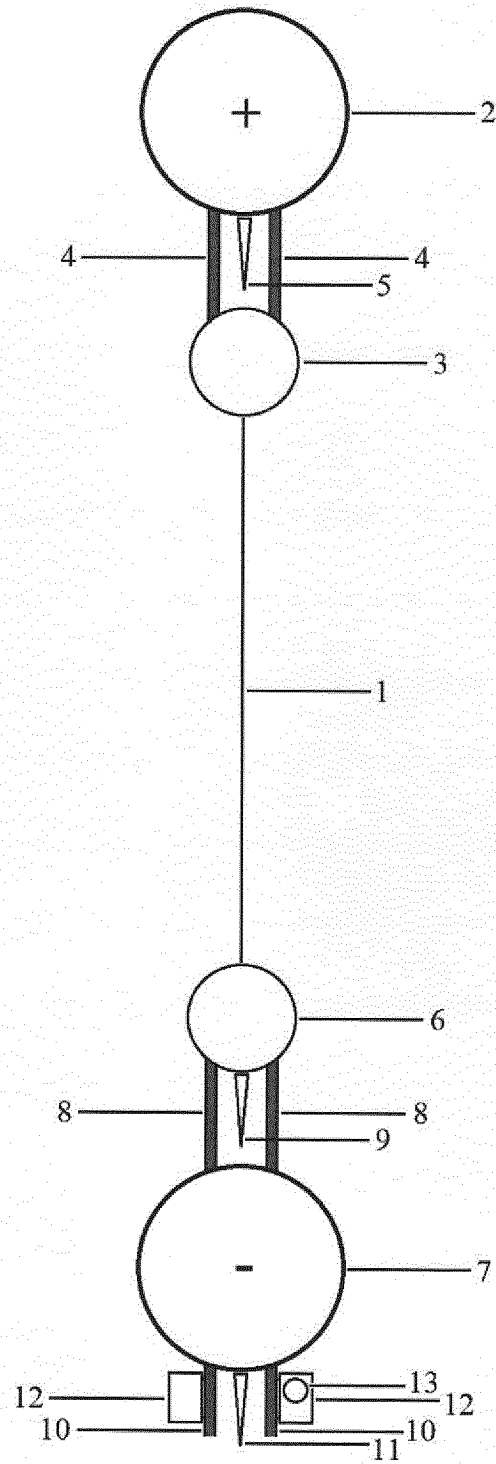
R — радиус орбиты центра масс.

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве



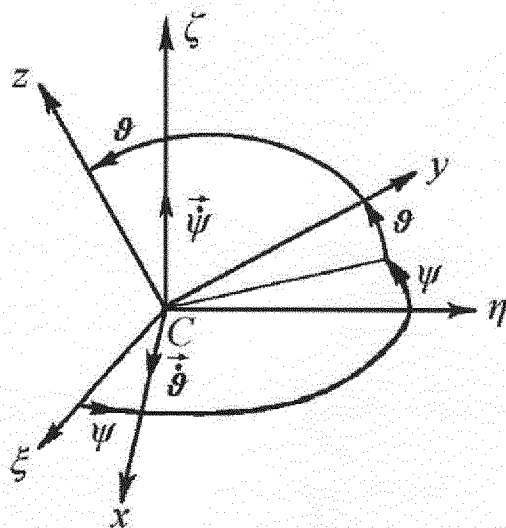
Фиг. 1

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

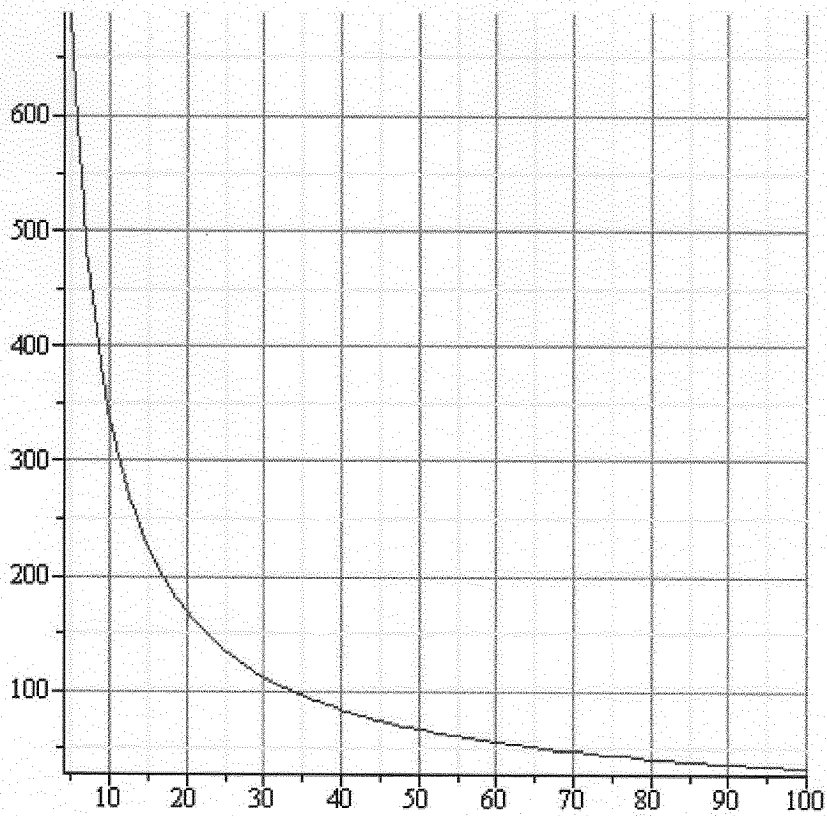


Фиг. 2

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

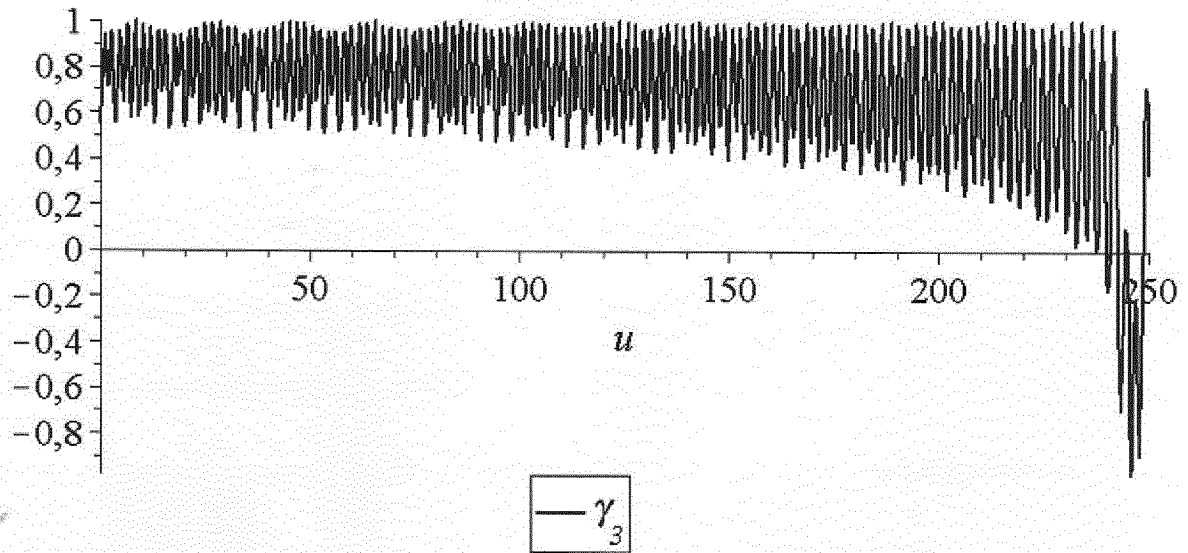


Фиг. 3

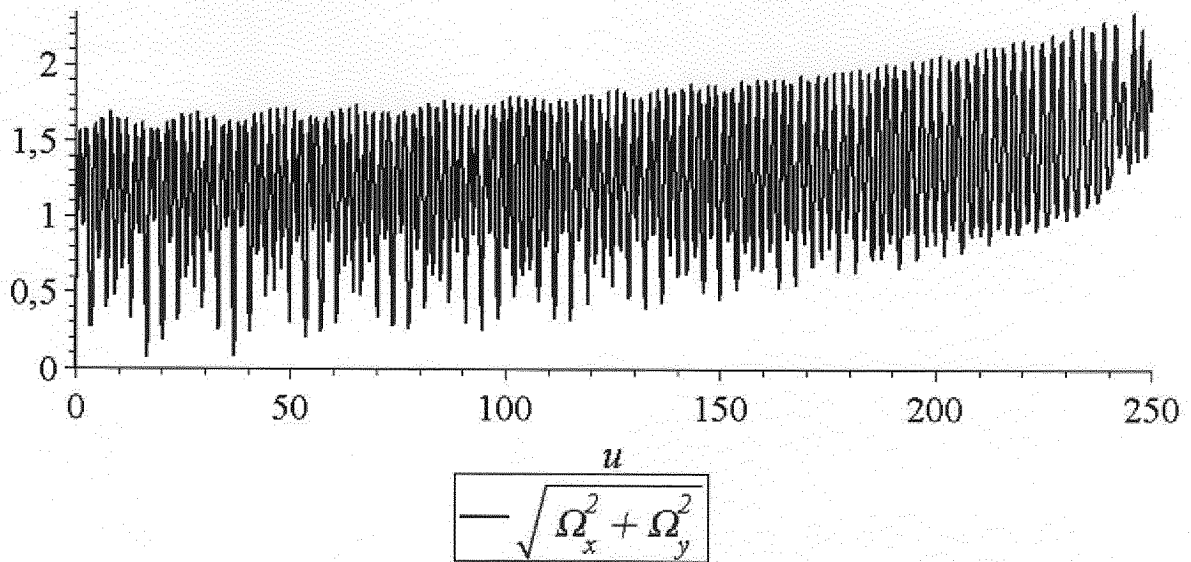


Фиг. 4

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

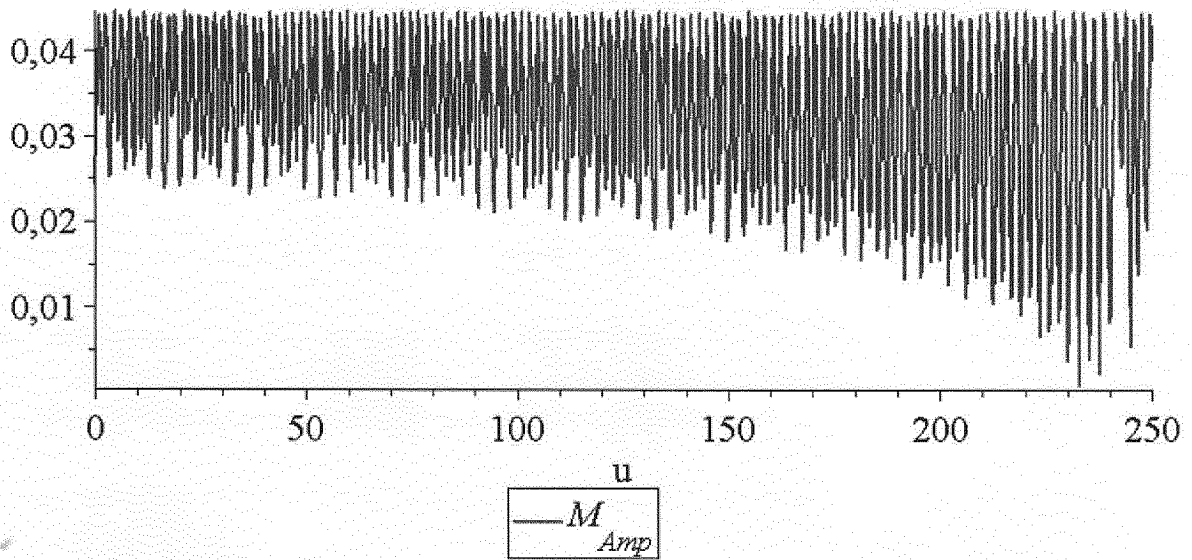


Фиг. 5

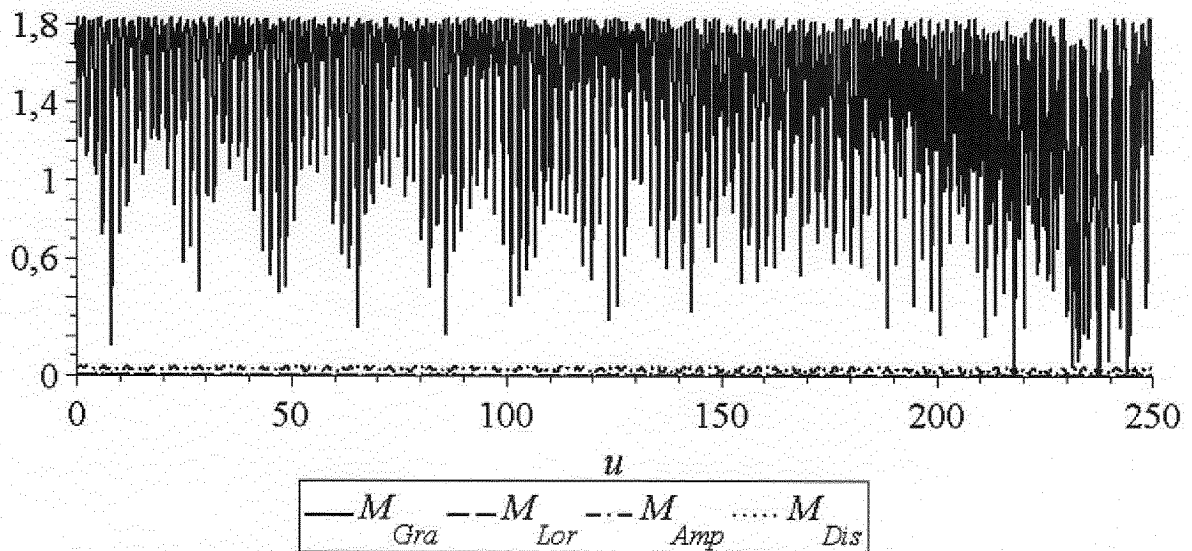


Фиг. 6

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

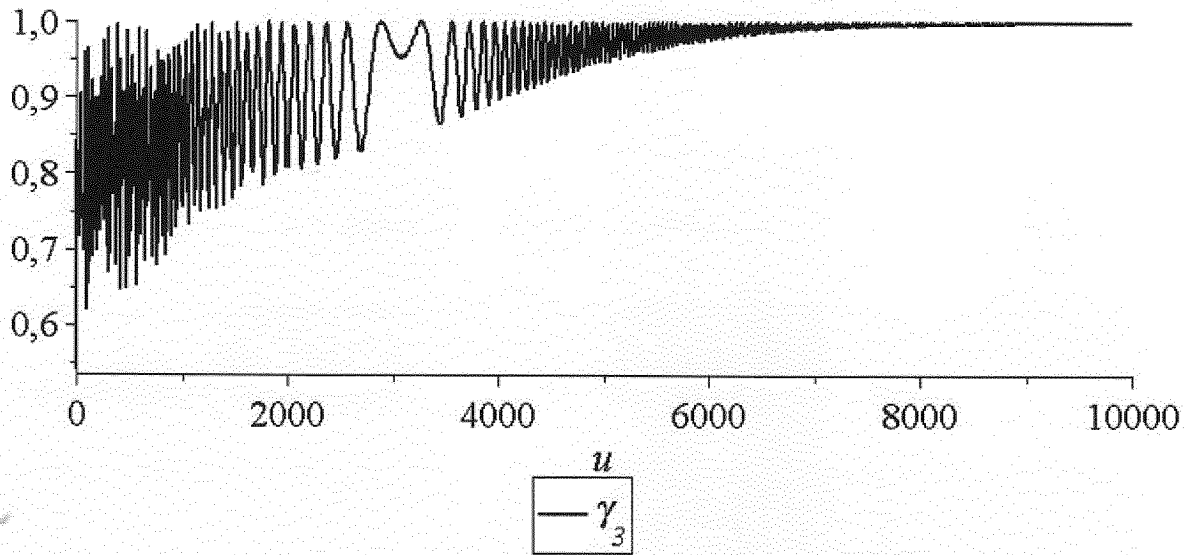


Фиг. 7

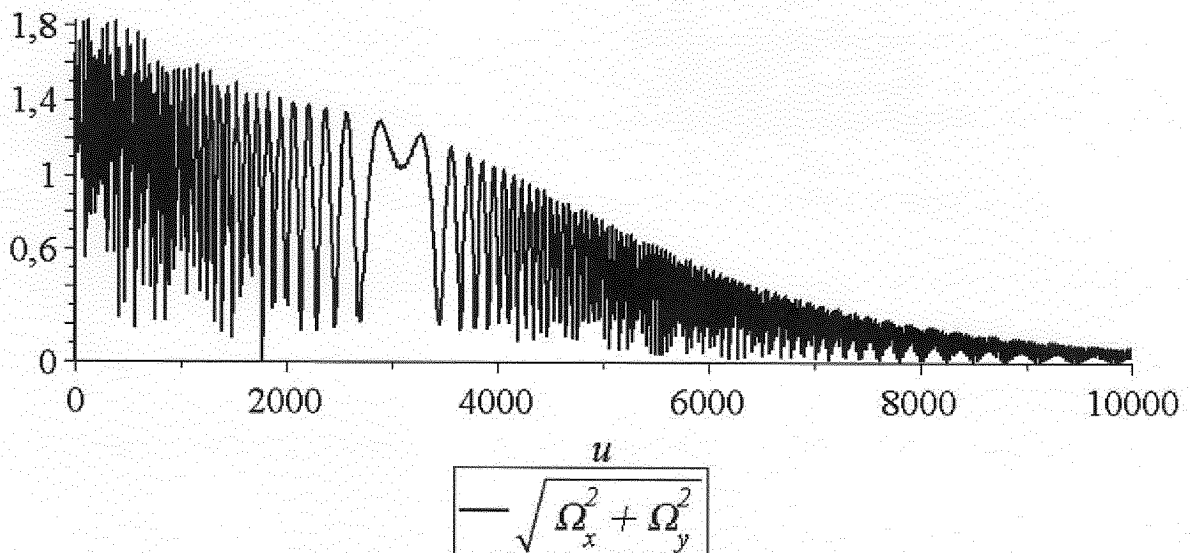


Фиг. 8

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

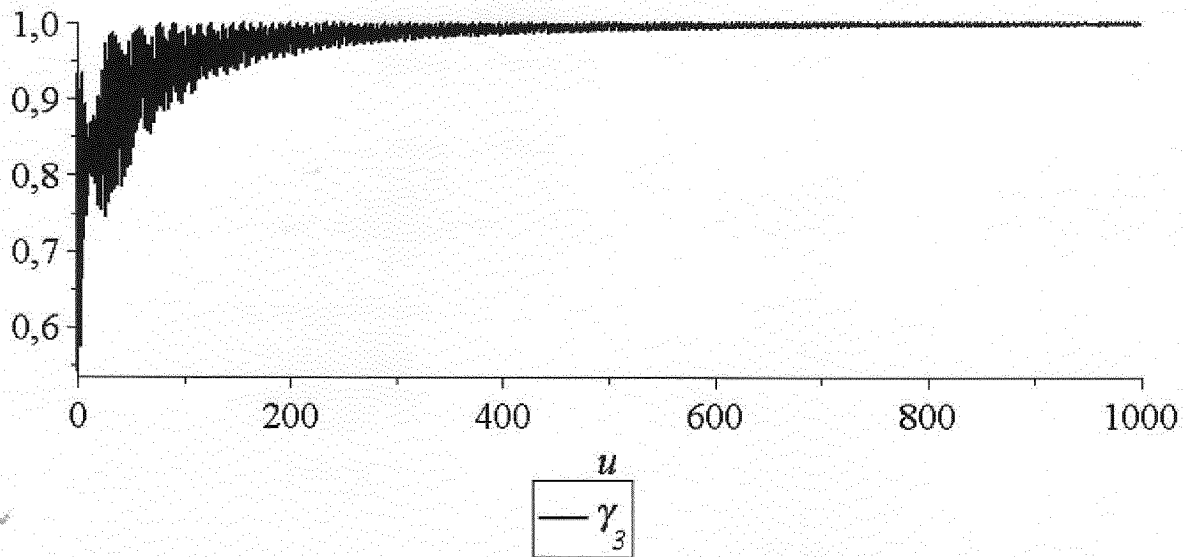


Фиг. 9

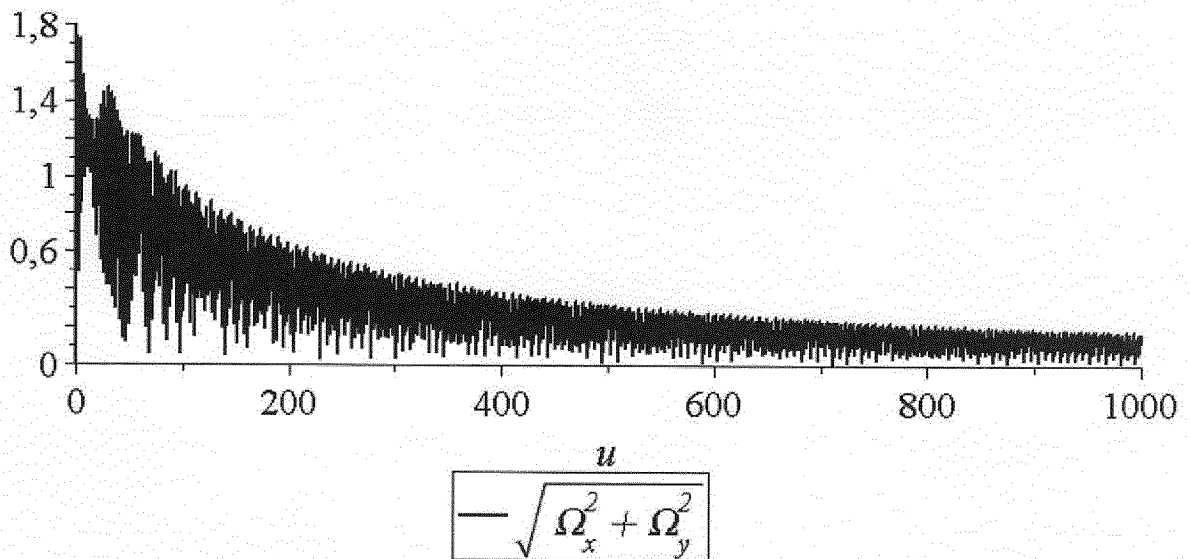


Фиг. 10

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

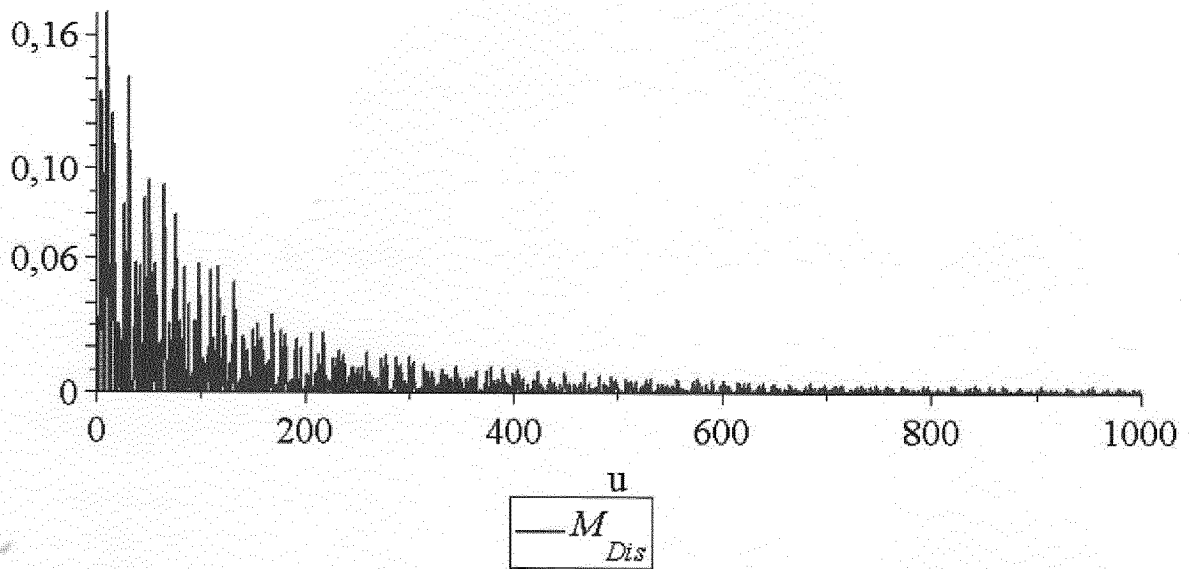


Фиг. 11

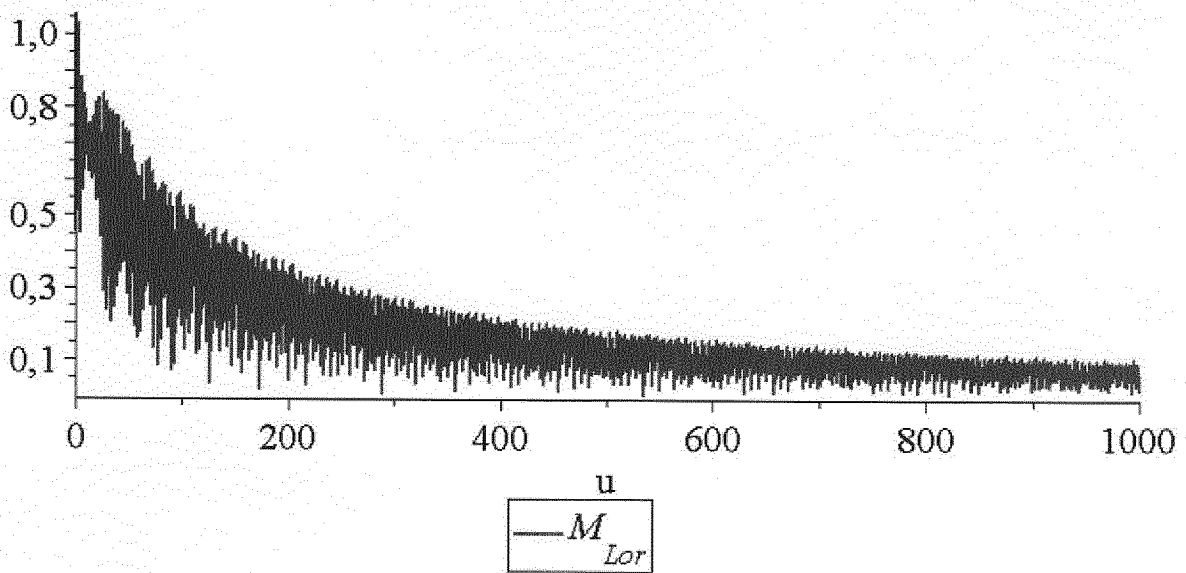


Фиг. 12

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве

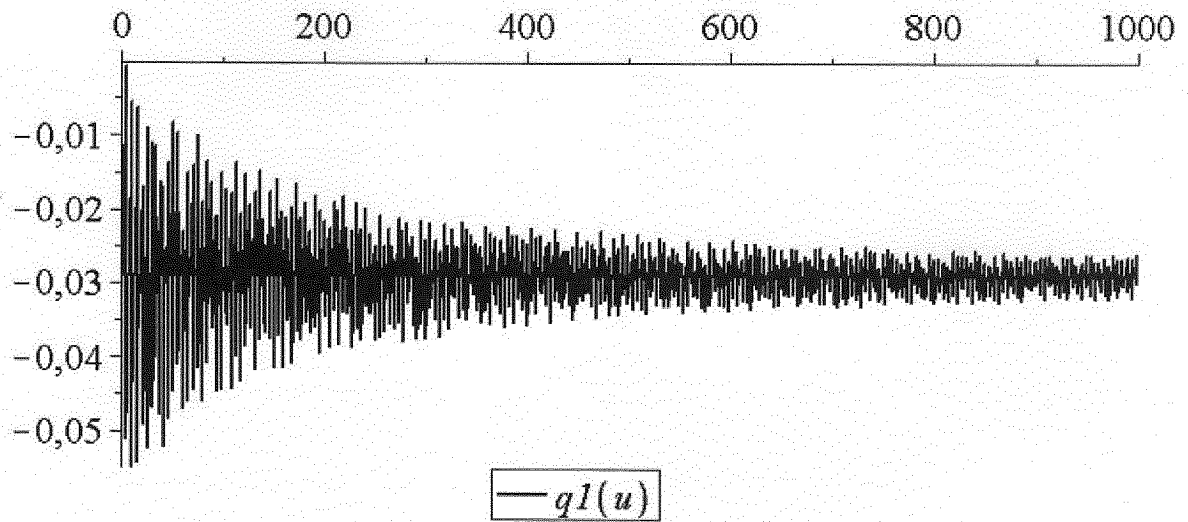


Фиг. 13



Фиг. 14

Демпфирующее устройство для
стабилизации электродинамической
тросовой системы в околоземном
пространстве



Фиг. 15