

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **035609**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.07.15

(51) Int. Cl. **B64G 1/32 (2006.01)**
B64G 1/34 (2006.01)

(21) Номер заявки
201700523

(22) Дата подачи заявки
2017.11.23

(54) **УСТРОЙСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

(31) **2017129790**

(56) US-B1-6758443
RU-C1-2332334
RU-A-98120769
RU-C1-2092401

(32) **2017.08.22**

(33) **RU**

(43) **2019.02.28**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

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

(72) Изобретатель:
Тихонов Алексей Александрович (RU)

(74) Представитель:
**Матвеев А.А., Матвеева Т.И., Леонов
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 устойчивой ориентации троса вдоль местной вертикали параметры троса выбирают в соответствии с условиями, учитывающими также влияние возмущающих моментов, что позволяет при наличии демпфирования решить задачу стабилизации троса в положении вдоль местной вертикали.

B1

035609

035609

B1

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.

В.В. Белецкий и Е.М. Левин в статье "Dynamics of Space Tether Systems," *Advances in the Astronautical Sciences*, v.83, AAS, 1993 описали многочисленные моды неустойчивости ЭДТС, наблюдаемые даже на круговых экваториальных орбитах в предположении стационарности геомагнитного поля.

J. Pelaez, E.C. Lorenzini, O. Lopez-Rebollal и M. Ruiz в докладе "A new kind of dynamic instability in electrodynamic tethers", AAS 00-190, AAS/AIAA Space Flight Meeting Jan. 23-26, 2000 выявили, что неустойчивость присуща всем неуправляемым движениям ЭДТС и ее просто невозможно избежать.

R.P. Hoyt и R.L. Forward в докладе "The Terminator Tether: Autonomous Deorbit of LEO Spacecraft for Space Debris Mitigation", AIAA 00-0329, 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 10-13 2000, Reno, Nevada пришли к выводу о том, что для борьбы с динамической неустойчивостью должно использоваться управление.

J. Corsi и L. Less в статье "Stability and control of electrodynamic tethers for de-orbiting applications", *Acta Astronautica* 48 (2001) 491-501 показали, что для успешного использования ЭДТС для удаления космического мусора следует периодически выключать ток, протекающий по тросу.

Zhong R. и Zhu Z.H. в статье [12] показали, что ЭДТС не может эффективно выполнять задачу увода космического мусора с орбиты в условиях неустойчивых колебаний и предложили простую стратегию управления током путем его периодического выключения.

Таким образом, проблема неустойчивости ЭДТС известна и рассматривается специалистами как критически важная [8, 12]. Решению этой проблемы посвящен ряд работ [11, 13, 14, 15]. Среди возможных подходов к ее решению предлагаются упомянутые выше варианты использования устройств для периодического выключения тока, протекающего по тросу, или переключения направления тока, а также более сложные варианты управления силой тока [16].

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 [17]. Поэтому общим недостатком известных способов управления электродинамическим тросом является периодическое выключение тока, протекающего по тросу, или переключение направления тока, что снижает эффективность ЭДТС и ограничивает возможности их использования.

Levin E.M. и Carroll J.A. в патенте [18] предложили отказаться от периодического выключения тока, протекающего по тросу, или переключения направления тока, и формировать управляющие сигналы на основе измерений параметров текущего состояния троса и последующих расчетов.

Наиболее близким к заявляемому устройству является патент [18], выбранный в качестве прототипа, предлагающий измерять напряжение и силу тока в тросе и, возможно, натяжение троса, чтобы обеспечивать такие вариации силы тока, которые совпадают со значениями силы тока, индуцированными геомагнитным полем при нежелательных компонентах скорости троса. При этом в соответствии с алгоритмом требуется интегрирование системы дифференциальных уравнений движения троса для выработки управляющего сигнала на формирование управляющего импульса силы тока.

Недостатком прототипа является сложность системы управления, вызванная необходимостью выполнения измерений для оценки состояния троса в процессе движения, что, в свою очередь, снижает ее надежность.

Задача изобретения заключается в упрощении устройства стабилизации троса, повышении его надежности, расширении области устойчивости вертикального положения троса. Решение этой задачи позволяет расширить область применимости ЭДТС, функционирующих в режиме ориентации вдоль местной вертикали.

Техническим результатом заявленного устройства является упрощение устройства стабилизации троса, повышение его надежности и расширение области устойчивости вертикального положения троса. Указанный технический результат реализуется заявленным устройством, схема которого поясняется фиг. 1 и 2. На фиг. 1 представлена орбитальная система координат $C\xi\eta\zeta$, являющаяся базовой системой при решении задачи стабилизации ЭДТС. Точка С является центром масс ЭДТС. В номинальном режиме ось

z , направленная вдоль натянутого троса, коллинеарна оси $C\xi$, направленной вдоль радиуса-вектора точки C относительно притягивающего центра. Оси $C\xi$ и $C\eta$ направлены соответственно по положительной трансверсали к орбите и по нормали к плоскости орбиты. На фиг. 2 представлена конструктивная схема ЭДТС, на фиг. 3 представлена граница области существования "косых" положений равновесия ЭДТС, на фиг. 4 представлены результаты численного моделирования процесса стабилизации ЭДТС.

Заявленное устройство поясняется фиг. 2, на которой 1 - коллектор положительного заряда, 2 - электроизолирующее крепление, 3 - электронный эмиттер (не менее чем один), электрически соединенный с коллектором 1 и расположенный внутри электроизолирующего крепления 2, соединяющего коллектор 1 и концевое тело 4 троса 5, противоположный конец которого заканчивается концевым телом 6. Концевое тело 6 электрически соединено с электронным эмиттером (не менее чем одним) 3, расположенным внутри электроизолирующего крепления 2, соединяющего концевое тело 6 троса 5 и коллектор отрицательного заряда 7.

Работа заявленного устройства поясняется фиг. 2. К концам проводящего изолированного троса 5 (фиг. 2) присоединены коллекторы - устройства для сбора электрических зарядов. Коллектор 1, находящийся на верхнем конце троса (том, который дальше от Земли), с помощью электроизолирующих креплений 2 соединен с концевым телом 4 проводящего троса 5. Коллектор 1 получает положительный заряд, поддерживаемый одним или несколькими электронными эмиттерами (например, полевыми электронными эмиттерами, холодными электронными эмиттерами на основе нанопористого углерода или холловскими ионными источниками) 3, передающими отрицательный заряд на концевое тело 4. На противоположном конце троса (том, который ближе к Земле) концевое тело 6 аналогичным образом соединено с коллектором 7. Коллектор 7 получает отрицательный заряд, поддерживаемый одним или несколькими электронными эмиттерами 3, передающими отрицательный заряд с концевого тела 6.

Технический результат, достигаемый заявляемым изобретением, состоит в упрощении устройства стабилизации троса, повышении его надежности и расширении области устойчивости вертикального положения троса.

Указанный технический результат достигается тем, что размещение положительно заряженного коллектора 1 (фиг. 2) на верхнем конце троса 5 (фиг. 2) и отрицательно заряженного коллектора 7 (фиг. 2) на нижнем конце троса приводит к возбуждению момента сил Лоренца, воздействующих на коллекторы и оказывающих ориентирующее действие на трос, а выполнение условий на параметры ЭДТС обеспечивает существование и устойчивость положения равновесия, и при наличии демпфирования (обеспечиваемого каким-либо из известных способов, например за счет тепловых потерь при протекании тока в тросе) решает задачу стабилизации троса в положении вдоль местной вертикали.

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 v_C относительно магнитного поля Земли (МПЗ), характеризуемого магнитной индукцией B , накопление электростатических зарядов q_1 и q_2 на коллекторах ЭДТС приводит к возникновению момента M_L лоренцевых сил, определяемого по формуле

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

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

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, а его вибрационное движение относительно центра масс не влияет на его орбитальное движение. При сделанных предположениях $\vec{P} = (q_1 z_1 + q_2 z_2) \vec{k}$, $\vec{v}_C = R(\omega_0 - \omega_E) \vec{e}_0$, где z_1 - расстояние от центра масс системы до центра масс устройств, присоединенных к тросу на нижнем конце, z_2 - расстояние от центра масс системы до центра масс устройств, 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 $\vec{B} = -g_1^0 (R_E/R)^3 \vec{n}_0$, 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 устойчивость положения равновесия троса в натянутом состоянии вдоль местной вертикали обеспечивается выбором таких параметров троса и присоединенных к нему вышеописанных устройств, для которых расстояния от центра масс системы до центров заряженных коллекторов одинаковы, и выполняется неравенство

$$\frac{R_E^3 |g_1^0| (\omega_0 - \omega_E)(q_2 - q_1)}{R^2 \omega_0^2 (\frac{4}{3}m_0 + 8m_2)z_2} > 1, \quad (2)$$

где m_0 - масса троса, m_2 - масса устройств, присоединенных к тросу на верхнем конце, z_2 - расстояние от центра масс системы до центра масс устройств, присоединенных к тросу на верхнем конце.

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, $q_1=-5 \cdot 10^{-2}$ Кл, $q_2=5 \cdot 10^{-2}$ Кл. Результат приведен на фиг. 3, где по горизонтальной оси отложены значения $m_0/6+m_2$ (в кг), а по вертикальной - значения z_2 (в м). Если длины и массы таковы, что изображающая точка лежит ниже кривой на графике, то неравенство (2) выполняется. Например, пусть $z_2=100$ м, $z_1=-100$ м, погонная масса троса $\gamma=2 \cdot 10^{-3}$ кг/м, $m_1=m_2=16$ 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. Модельный диссипативный момент пропорционален относительной угловой скорости ЭДТС $M_D=-hJ\omega_0\omega'$ и содержит множителем безразмерный малый параметр, выбранный равным $h=0.001$. J - тензор инерции ЭДТС.

Фиг. 4-6 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. 4), все сильнее отклоняющегося от целевого значения $\gamma_3=1$ под действием амперова момента, а также поведением компонент относительной угловой скорости, отнесенной к орбитальной угловой скорости (фиг. 5). Заметим, что при этом во все время движения величина возмущающего амперова момента остается малой (фиг. 6) - на 2 порядка меньше величины гравитационного момента (фиг. 7), стремящегося стабилизировать ЭДТС вдоль местной вертикали.

Фиг. 8-11 иллюстрируют движение ЭДТС с ненулевыми зарядами на коллекторах (система стабилизации работает): $q_1=-0.05$ Кл, $q_2=0.05$ Кл). Все остальные параметры ЭДТС и начальные условия ее движения сохранены без изменений, как в случае фиг. 4-7, соответствующих нерабочему режиму системы стабилизации. Результаты численного интегрирования показывают, что направляющий косинус γ_3 стремится к целевому значению $\gamma_3=1$ (фиг. 8), а компоненты относительной угловой скорости, отнесенной к орбитальной угловой скорости, стремятся к нулю (фиг. 9). При этом диссипативный момент остается весьма малым по величине (на порядок меньше возмущающего - амперова момента и на 3 порядка меньше гравитационного момента) во все время движения (фиг. 10) и по этой причине соответствующая ему кривая сливается с горизонтальной осью на фиг. 11, где приведены модули всех действующих на ЭДТС моментов.

На всех фиг. 4-11 по горизонтальной оси откладывается безразмерный угол - аргумент широты $u=\omega_0 t$. Заметим, что в данном примере для иллюстрации 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. 4 и 8, а также фиг. 5 и 9, свидетельствует о том, что заявляемое устройство, технически более простое и надежное по сравнению с прототипом, заметно расширяет область устойчивости вертикального положения троса (повышает устойчивость вертикального положения троса), а, следовательно, повышает работоспособность ЭДТС.

Как показали приведенные выше примеры, компьютерное моделирование процессов стабилизации ЭДТС в режиме вертикального расположения троса, аналитические исследования и численные эксперименты, заявленное устройство может работать в режиме отсутствия системы управления силой тока, пропускаемого по тросу, что упрощает устройство стабилизации троса и повышает его надежность. При этом заявленное устройство, как показал пример 2, расширяет область устойчивости вертикального положения троса за счет эффективно реализованной возможности разделения зарядов на концах троса и использования возникающего вследствие этого момента сил Лоренца - дополнительного стабилизирую-

шего момента. Все это позволяет эффективнее по сравнению с аналогами обеспечить номинальный режим движения ЭДТС для удаления космического мусора. Изобретение создано при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-01-00672-а).

Список использованной литературы.

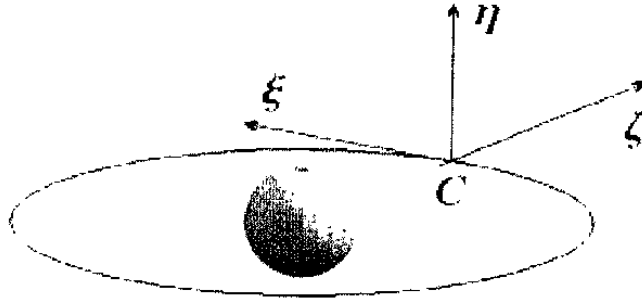
1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М., Наука, 1990, 336 с.
2. Forward R.L. Electrodynamic drag terminator tether, Appendix K of high strength-to-weight tapered Hoytether for LEO to GEO payload transport, Final Report on NASA SBIR Phase I Contract NAS8-40690, 10 July 1996.
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. Yamaigawa 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. Levin E.M., Carroll J.A. Method for observing and stabilizing electrodynamic tethers, U.S. Pat. No. 6,758,443 B1, Jul. 6, 2004.
17. Roberts et al. Tether power generator for Earth orbiting satellites, U.S. Pat. No. 4,923,151 B1, Mar. 1, 1998.
18. Levin E.M., Carroll J.A. Apparatus for observing and stabilizing electrodynamic tethers, U.S. Pat. No. 6,755,377 B1, Jun. 29, 2004. – прототип
19. Белецкий В.В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. М., изд. Моск. ун-та, 1975. 308 с.
20. 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 (No. 15). С. 81-91.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

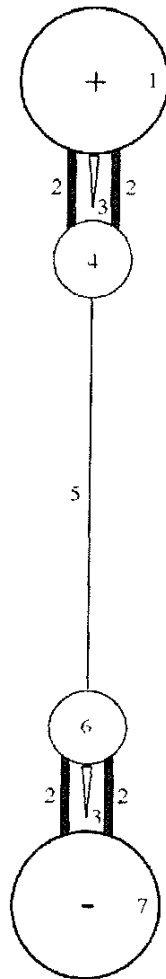
Устройство стабилизации электродинамической тросовой системы для удаления космического мусора, содержащее проводящий электроизолированный трос, отличающееся тем, что один конец троса снабжен коллектором положительно заряженных частиц, соединенным с концевым телом троса через электроизолятор, внутри которого 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, при этом расстояния от центра масс системы до центров заряженных коллекторов одинаковы, а параметры троса и присоединенных к нему устройств подобраны для выполнения неравенства

$$\frac{R_E^3 |g_1^0| (\omega_0 - \omega_E)(q_2 - q_1)}{R^2 \omega_0^2 (\frac{4}{3}m_0 + 8m_2)z_2} > 1,$$

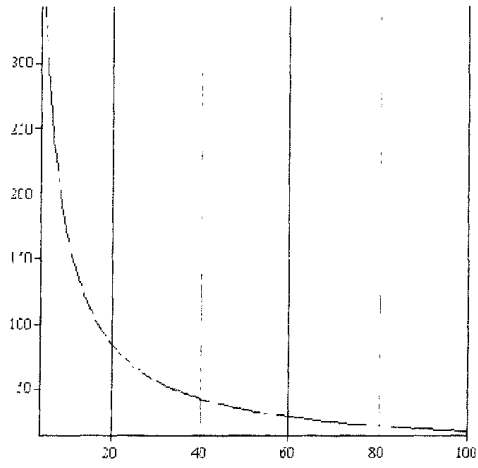
где R_E - средний радиус Земли, $g_1^0 = -29556.8$ нТл - гауссов коэффициент, ω_0 - орбитальная угловая скорость центра масс, ω_E - угловая скорость суточного вращения Земли, q_1 - отрицательный заряд, накопленный коллектором на нижнем конце, q_2 - положительный заряд, накопленный коллектором на верхнем конце, R - радиус орбиты центра масс, m_0 - масса троса, m_2 - масса устройств, присоединенных к тросу на верхнем конце, z_2 - расстояние от центра масс системы до центра масс устройств, присоединенных к тросу на верхнем конце, для обеспечения устойчивого положения равновесия троса в натянутом состоянии вдоль местной вертикали.



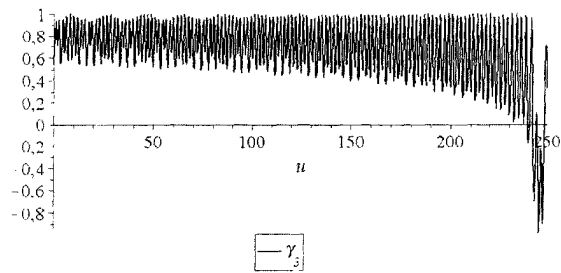
Фиг. 1



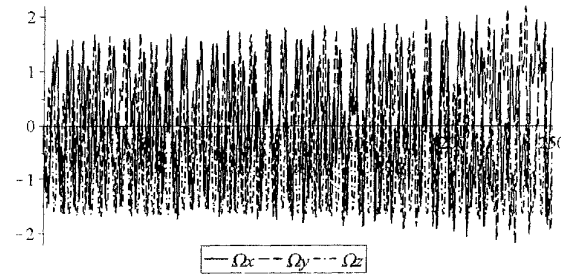
Фиг. 2



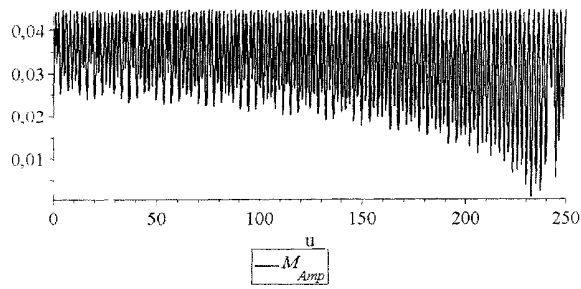
Фиг. 3



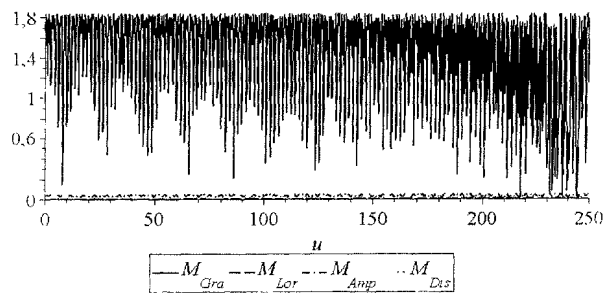
Фиг. 4



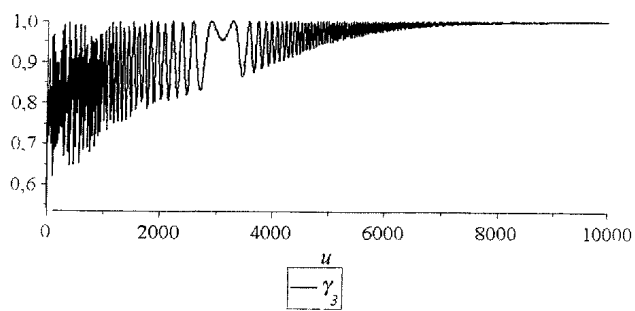
Фиг. 5



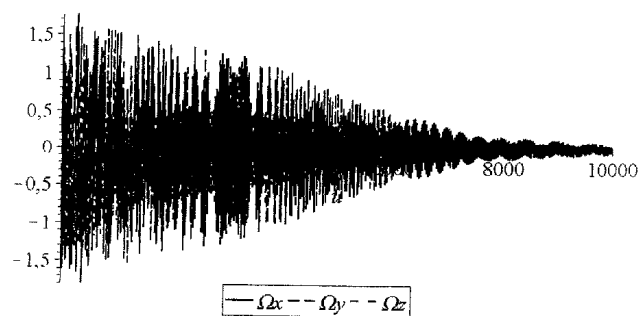
Фиг. 6



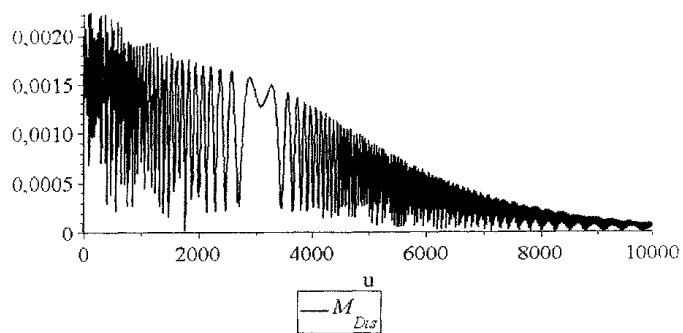
Фиг. 7



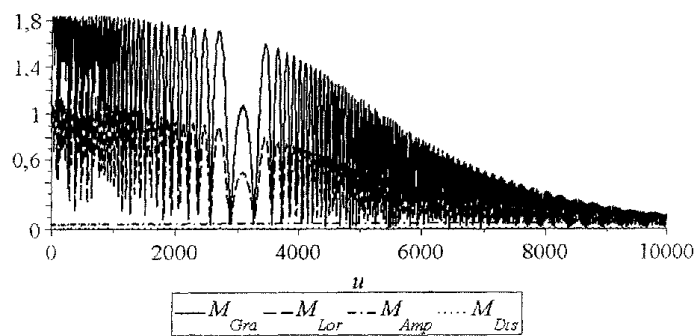
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

