

Анализ эффективности технологий активного удаления космического мусора с геостационарной орбиты

А.А. Внуков^{1*}, Т.Н. Баландина²

¹ ООО «Научно-производственный центр «Малые космические аппараты»
Российская Федерация, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Школьная, 33-25

² АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

*e-mail: vnukovalx@ya.ru

В работе рассмотрены основные технологии активного удаления космического мусора с геостационарной орбиты. Для двух из них: стыковка сервисного КА с объектом космического мусора при помощи манипулятора сервисного КА (жёсткая связка) и захват объекта космического мусора сетью или гарпуном (гибкая связка), – приведён перечень основных возмущающих моментов, действующих на сервисный КА в процессе стыковки и буксировки объекта космического мусора на орбиту захоронения. Выполнен сравнительный анализ ресурсоёмкости схем удаления космического мусора с геостационарной орбиты при помощи жёсткой и гибкой сцепок.

Ключевые слова: космический мусор, геостационарная орбита, технологии активного удаления космического мусора, жёсткая связка, гибкая связка, возмущающие моменты.

Список сокращений

ГСО – геостационарная орбита;

КА – космический аппарат;

ОКМ – объект космического мусора;

СКА – сервисный КА.

Введение

Проблема очистки геостационарной орбиты от объектов космического мусора заключается в невозможности или нецелесообразности пассивного удаления нефункционирующих КА и последних ступеней РН из защищаемой области ГСО. Вследствие малого эксцентриситета КА на ГСО, естественная эволюция высот перигея и апогея орбиты настолько мала, что, несмотря на периодические (с периодом порядка 15 лет) колебания этих значений, средняя высота, например, перигея за 100 лет меняется не больше, чем на

10 км. Это недопустимо мало с точки зрения обеспечения выполнения требований национальных и международных стандартов в части недопущения столкновений ОКМ с действующими КА на ГСО [1].

В связи с вышесказанным, различными аэрокосмическими агентствами ведутся исследования возможностей активного воздействия на ОКМ на ГСО с целью перевода этих объектов на орбиту захоронения. Наиболее проработанными являются три концепции:

- сближение СКА с ОКМ на расстояние в несколько метров, жёсткий захват ОКМ с помощью манипулятора, установленного на СКА, ориентация связки ОКМ-СКА линией действия тяги маршевых двигателей СКА по вектору орбитальной скорости и последующая управляемая буксировка связки ОКМ-СКА на орбиту захоронения;
- сближение СКА с ОКМ на расстояние в несколько десятков метров, дистанционный захват ОКМ с помощью гарпуна или сети, выбрасываемых с СКА, ориентация СКА линией действия тяги маршевых двигателей по вектору скорости и последующая буксировка ОКМ на гибкой сцепке;
- сближение СКА с ОКМ на расстояние в несколько десятков метров, воздействие в направлении центра масс ОКМ вдоль вектора орбитальной скорости связки СКА-ОКМ реактивной струёй и создание таким образом необходимого импульса для увода ОКМ на орбиту захоронения.

В данной работе проведён сравнительный анализ эффективности механических средств воздействия на ОКМ, как наиболее проработанных на сегодняшний день и обладающих сравнительной простотой реализации.

Обзор проектов стыковки на орбите при помощи манипуляторов

Наибольших успехов разработчики достигли в области стыковки СКА с ОКМ при помощи манипуляторов. В первую очередь это связано с тем, что манипуляторы активно использовались в программе Space Shuttle и в настоящее время используются на Международной космической станции.

Манипулятор представляет собой многозвенный механизм, оборудованный захватом или видеокамерой, а иногда захватом и видеокамерой одновременно. Поворот каждого звена обеспечивается электромоторами, конструктивно объединёнными с шарнирами. Достаточное

количество звеньев позволяет обеспечить необходимую универсальность манипулятора, но усложняет процесс управления как самим манипулятором, так и СКА, на котором этот манипулятор закреплён.

Манипулятор проекта DEOS представлен на рисунке 1. Его масса составляет 40 кг, из которых около 36 кг приходится на звенья и шарниры, а 4 кг – на устройство захвата [2].



Рисунок 1 – Манипулятор проекта DEOS

В рамках проекта Phoenix был разработан манипулятор FRIEND, масса которого составляет 78 кг и ещё 10 кг приходится на электронный блок управления манипулятором [3].

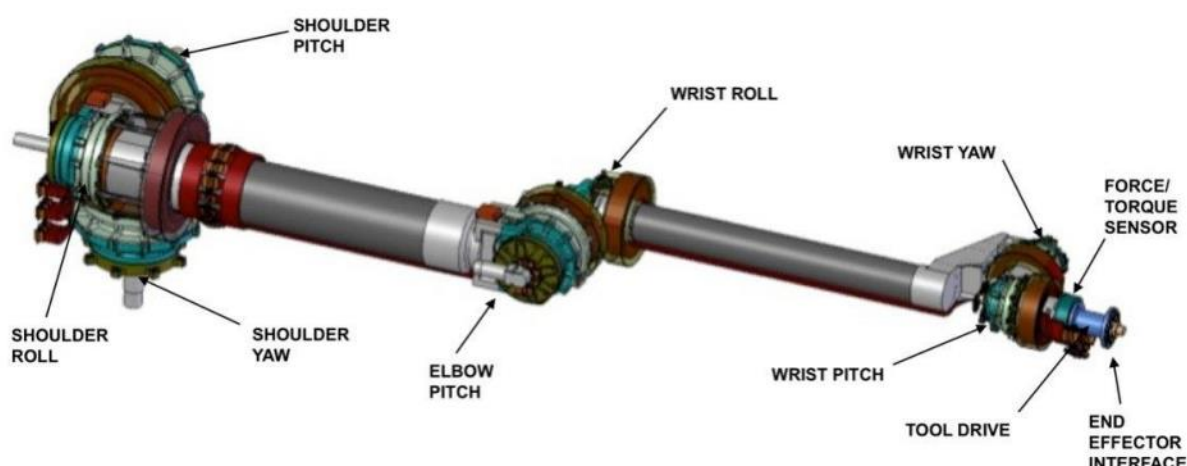


Рисунок 2 – Манипулятор FRIEND проекта Phoenix

Компания Tethers Unlimited разработала прототип манипулятора «Кракен» [4], который представляет собой небольшую лёгкую конструкцию, разработанную с целью применения на перспективных мини- и микроспутниках, решающих задачи сборки конструкций на орбите, технического обслуживания космических аппаратов и очистки орбит от объектов космического мусора. Конструкция манипулятора позволяет сложить его в объёме полтора литра, при этом «Кракен» способен осуществлять операции в пространстве полусферы радиусом метр. Благодаря модульному исполнению «Кракена» существует возможность увеличения

радиуса рабочей полусферы до двух метров путём добавления новых звеньев в конструкцию манипулятора.

Общий вид манипулятора «Кракен» с семью степенями свободы представлен на рисунке 3, основные характеристики системы – в Таблице 1.



Рисунок 3 – Внешний вид складного манипулятора «Кракен»

Таблица 1 – Основные характеристики манипулятора «Кракен»

Параметр	Значение
Длина манипулятора, м	≤ 2
Количество степеней свободы	≤ 11
Объём в сложенном состоянии, л	1,5
Точность позиционирования, мм	± 10
Общая масса системы, кг	4,2

Обзор проектов стыковки на орбите при помощи гибкой сцепки

Гибкие сцепки исследованы в меньшей степени из-за их «одноразовости» – ошибка в нацеливании и захвате тестового ОКМ может привести к потере контактной части гибкой сцепки (сети или гарпуна) или к возникновению на орбите нового объекта космического мусора, поэтому натурные испытания гибкой сцепки до сих пор не проводились, и все исследования проводятся исключительно на цифровых моделях.

Концепция ROGER (RObotic GEostationary orbit Restorer) [5] предложена Европейским космическим агентством в 2014 году. Сервисный КА массой 3500 кг имеет возможность проводить инспекцию

обслуживаемого КА, стабилизацию и его перемещение на другие орбиты с использованием системы захвата в виде сети, выбрасываемой на расстояние, исключающее столкновение сервисного и обслуживаемого КА (рисунок 4). В первую очередь многоуровневая система предназначалась для увода некооперируемых КА с целевых орбит на орбиты захоронения.

Предполагалось разработать сервисный КА на базе спутниковой платформы, разработанной в Airbus. Возможны незначительные отличия в конструкции сервисных КА, предназначенных для различных миссий.

Сервисный КА оснащается апогейной двигательной установкой (масса топлива – 2700 кг, с возможностью увеличения до 3200 кг, 22 ЖРД с тягой 10 Н и апогейным двигателем с тягой 400 Н), количество двигателей в которой может варьироваться в зависимости от поставленных целей. В качестве источника электрической энергии служат солнечные батареи. Собственное энергопотребление КА составляет 300 Вт.



Рисунок 4 – Концепция ROGER

Основные трудности при разработке системы:

- возможность безопасного захвата спутника-цели, изменения динамики КА-цели, а также различие форм и размеров целевых спутников, наличие жестких поверхностей и возможных узлов стыковки (точность наведения КА – менее $0,25^\circ$);

- оптимизация количества спутников-целей, которые могут быть переведены на орбиты захоронения в течение одной миссии базового аппарата с учетом необходимости его дозаправки, времени, затраченного на перевод КА-цели на орбиту захоронения;
- возможность создания мобильных робототехнических систем захвата (предполагаемая масса механизма составляет 9 кг, размер сети – $10 \times 10 / 15 \times 15$ м, транспортировочный объем – 5 л).

Также стальную сеть для сборки космического мусора разработало Японское агентство аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)) (рисунок 5) [6].

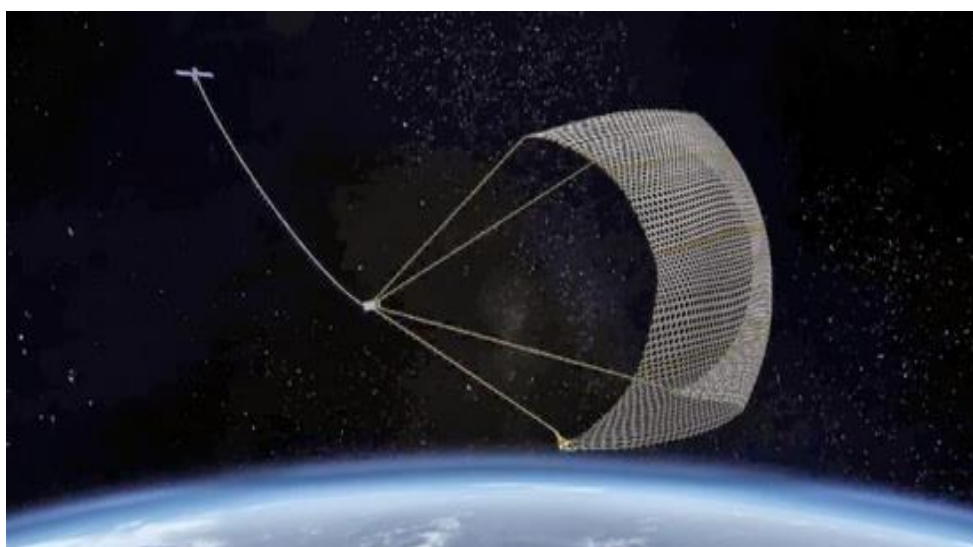


Рисунок 5 – Стальная сеть для сборки космического мусора

Ученые из японского космического агентства в 2016 году пытались протестировать электродинамическую «привязь» – созданную при участии компании, производящая рыболовные сети – для замедления находящегося на орбите фрагмента космического мусора и сведения его на более низкую орбиту, с которой он в дальнейшем должен был упасть в плотные слои земной атмосферы и безопасно сгореть в кислороде воздуха.

700-метровая сеть – выполненная из тонкой проволоки из нержавеющей стали и алюминия – должна была быть высвобождена с борта космического корабля, выполнившего свою задачу по доставке грузов на Международную космическую станцию и отбившего с неё для сжигания в атмосфере Земли, однако в действительности высвобождения привязи не произошло. В течение недели японские специалисты пытались найти выход из этой ситуации, однако их старания не увенчались успехом.

Гарпун, предложенный фирмой Airbus Defence & Space (бывшая Astrium) [7], признан наиболее подходящей технологией захвата космического мусора из всех технологий, исследованных EADS за последние несколько лет. Его преимуществами являются: совместимость с различными типами космического мусора (последние ступени РН или космические аппараты); простота наземной отработки и сравнительная нечувствительность к скорости вращения объекта космического мусора или расположению точки закорения. Система состоит из собственно гарпуна, пускового устройства и троса. Гарпун состоит из шипованного наконечника для обеспечения зацепления за объект космического мусора, разрушающегося пояса для контроля глубины проникновения наконечника, древка для взаимодействия с пусковой установкой и стабилизатора для наземных испытаний. Пусковая установка гарпуна работает на сжатом азоте и может быть использована для запуска нескольких гарпунов, установленных на сервисном космическом аппарате. Сервисный КА после прицеливания и выстрела остаётся связанным с объектом космического мусора посредством гарпуна и троса Дупеета, который хранится на СКА, намотанным на катушку. Трос рассчитан на предельную нагрузку 1,6 кН.

Общий вид гарпуна представлен на рисунке 6, основные характеристики системы – в Таблице 3.

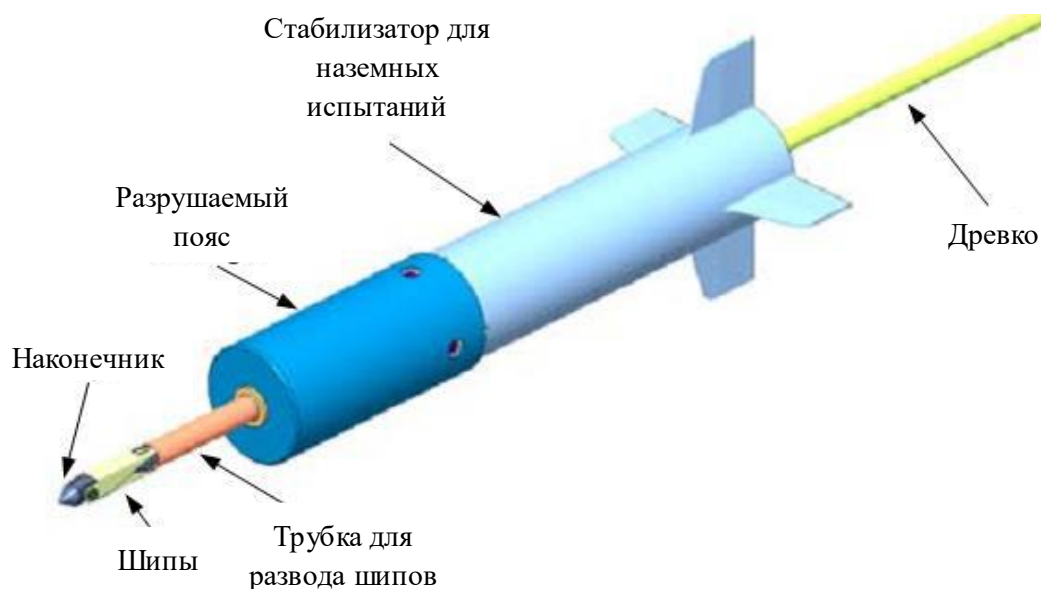


Рисунок 6 – Внешний вид гарпуна EADS

Таблица 2 – Основные характеристики гарпуна Astrium

Параметр	Значение
Масса объекта КМ, кг	≤ 9000

Габариты системы, мм	585×400
Потребляемая мощность, Вт	20
Дальность стрельбы, м	≥ 10
Масса гарпуна, кг	1,3
Общая масса системы из двух гарпунов, кг	8

Возмущающие моменты при стыковке СКА с ОКМ

При организации механической связи с ОКМ, совершающим движение относительно центра масс СКА, возникает кинетический момент, численно равный произведению момента инерции тела относительно оси вращения на его угловую скорость [8]:

$$\begin{cases} K_x = J_x \cdot \omega_x \\ K_y = J_y \cdot \omega_y \\ K_z = J_z \cdot \omega_z \end{cases} \quad (1)$$

За ось вращения в данном случае принимается точка крепления системы стыковки (манипулятора или гибкой сцепки) к СКА.

Для обеспечения управляемого движения связки ОКМ-СКА система ориентации и стабилизации должна создавать управляющий момент, равный производной кинетического момента СКА, вызванного стыковкой с ОКМ, по времени:

$$\begin{cases} M_x = \frac{dK_x}{dt} = \frac{d(J_x \cdot \omega_x)}{dt} \\ M_y = \frac{dK_y}{dt} = \frac{d(J_y \cdot \omega_y)}{dt} \\ M_z = \frac{dK_z}{dt} = \frac{d(J_z \cdot \omega_z)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

Принимая момент инерции ОКМ постоянным, и считая изменение угловой скорости СКА при механической стыковке с ОКМ мгновенным, определяем, что величина управляющего момента, компенсирующего возмущения при стыковке, зависит только от угловой скорости движения ОКМ относительно СКА.

Учитывая, что $\omega = \frac{V}{R}$, где V – проекция орбитальной скорости ОКМ на соответствующую ось системы координат, связанной с СКА, а R – расстояние между СКА и ОКМ, величина требуемого компенсирующего

момента обратно пропорциональна длине механической связи между СКА и ОКМ.

Гибкая связь по определению используется для стыковки с ОКМ на расстоянии в десятки метров большем, чем длина манипуляторов СКА, а следовательно для парирования возмущающих моментов гибкой связи требуется в десятки раз большие затраты со стороны систем СКА, чем для парирования возмущающих моментов манипулятора.

Однако кроме кинетического момента, возникающего в результате движения ОКМ относительно СКА, манипулятор, во время поворота отдельных их звеньев вокруг шарниров, создаёт кинетический момент, который изменяет ориентацию СКА в пространстве. Поэтому необходимо создавать, например, при помощи маховиков СОС, управляющие моменты для компенсации возмущений от работы манипулятора. Так, например, для СКА с двухзвенным манипулятором (рисунок 7) попытка переместить захват манипулятора из точки А в точку В, приведёт к изменению положения КА в пространстве, как показано на рисунке 8 [9].

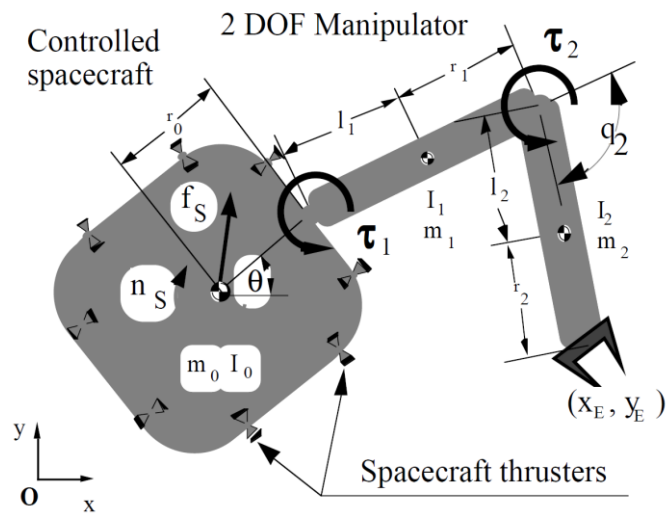


Рисунок 7 – СКА с двухзвенным манипулятором

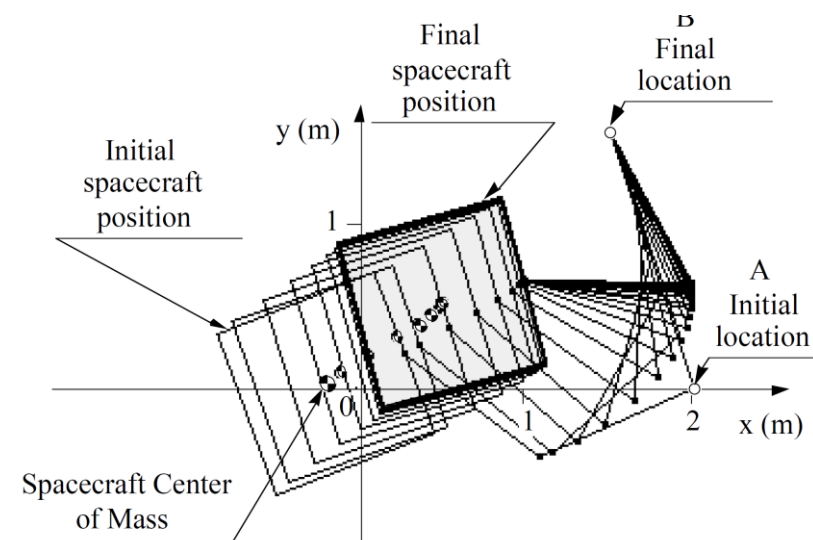


Рисунок 8 – Кинематика работы двухзвенного манипулятора СКА

Таким образом, затраты ресурсов СКА при стыковке с ОКМ при помощи манипулятора складываются из затрат на парирование возмущающего кинетического момента движения ОКМ относительно СКА и затрат на парирование возмущающих кинетических моментов от движения отдельных звеньев манипулятора относительно СКА. Однако, в связи с тем, что масса звеньев манипулятора мала по сравнению с массой ОКМ, затратами на парирование кинетического момента от движения звеньев манипулятора можно пренебречь.

Сравнительный анализ эффективности КА, оборудованных манипуляторами, и КА, оборудованных гибкой сцепкой

Наиболее отработанной схемой стыковки СКА с ОКМ в настоящее время является стыковка при помощи манипуляторов. Такая схема имеет длительный опыт эксплуатации и была многократно испытана на орбите для работы в автоматическом режиме. Система стыковки при помощи гибкой сцепки до сих пор не имеет лётной квалификации.

Масса манипуляторов может составлять от десяти до сорока килограмм, в зависимости от длины звеньев. Для эффективной стыковки необходимо минимум два манипулятора: один для стыковки, а другой для размещения оптических средств контроля стыковки. Таким образом, суммарная масса системы стыковки при помощи манипуляторов будет приближаться к 100 кг.

Масса гибкой сцепки (сети или гарпуна) не превышает 10 кг. Для эффективной работы системы стыковки при помощи гибкой сцепки система

видеонаблюдения не требует дополнительных механических средств и может быть размещена на корпусе СКА.

Возмущающие моменты, вызванные движением ОКМ относительно СКА, для системы стыковки с гибкой сцепкой в десятки раз выше возмущающих моментов для системы стыковки при помощи манипуляторов, следовательно затраты СКА на их парирование в десятки раз выше. Однако при парировании возмущающих моментов при помощи электромеханических средств (управляющие маховики и гироскопы) расходуемый на парирование ресурс является возобновляемым, что нивелирует разницу. Это возможно в случае, когда масса ОКМ меньше или сравнима с массой ОКМ.

Манипулятор является многоразовой системой и по завершении манёвра увода ОКМ на орбиту захоронения может быть использован повторно, в то время как гибкая сцепка предусматривает расстыковку СКА и ОКМ только за счёт отделения системы гибкой сцепки от СКА, а следовательно для обеспечения многоразового использования СКА с гибкой сцепкой, он должен быть оборудован множеством систем гибкой сцепки. Таким образом, эффективность гибкой сцепки по массе существует только в случае, если СКА предназначен для удаления единственного объекта ОКМ.

Выводы

СКА, оборудованные манипуляторами, эффективны для многократного удаления ОКМ с массой, превышающей массу СКА, при этом для парирования возмущающих кинетических моментов от большого ОКМ можно использовать как безрасходные средства (электромеханические исполнительные органы), так средства, расходующие невозобновляемый ресурс (реактивные двигатели).

СКА, оборудованные гибкой сцепкой, эффективны для однократного удаления ОКМ с массой, не превышающей массу СКА, при этом для парирования возмущающих кинетических моментов целесообразно использовать только безрасходные средства управления движением.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52925-2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Введ. 2009-01-01. М., 7 с.
2. Sommer, B., Landzettel, K, «DEOS Deutsche Orbitale Servicing Mission:

the in-flight technology demonstration of Germany's Robotic approach to service satellites» / The NASA second international workshop on on-orbit satellite servicing, May, 2012

3. Henshaw, G., Kelm, B., «DARPA Phoenix. Overview and Risk Reduction Plans» / i-SAIRAS Conf., 2014
4. On Orbit Servicing.
Режим доступа: <http://www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2013/2013iaf-05E.pdf>
5. B. Bischof, L. Kerstein, J. Starke, et al., «Roger-Robotic geostationary orbit restorer» in Proceedings of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, 2004
6. Japan's blasts a giant 'fishing net' into space to clear up some of the 100 MILLION pieces of junk in Earth's orbit / By Associated Press and Abigail Beall For Mailonline/ PUBLISHED: 13:47 BST, 9 December 2016 / UPDATED: 17:48 BST, 9 December 2016. Режим доступа: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4017316/Japan-launches-needed-supplies-space-station.html>
7. J. Reed, J. Busuets, and C. White. Grappling system for capturing heavy space debris. In 2nd European Workshop on Active Debris Removal, 2012.
8. Интернет-тестирование по теоретической механике. Выпуск 5. Количество движения и кинетический момент. Методические указания для подготовки к интернет - тестированию по теоретической механике, Нижний Новгород, ННГАСУ, 2011 г.
9. Papadopoulos, E., Dubowsky, S., «Coordinated Manipulator/Spacecraft Motion Control for Space Robotic Systems» / Proceedings of International Conference on Robotics and Autanatim, Sacramento, CA, USA, 1991 year, pp. 1696-1701