

Орбитальный переход Гомана посредством вращающихся тросовых систем

Екимовская Анна Алексеевна

11 класс, МАОУ СОШ № 40, г. Череповец Вологодской области

Научный руководитель д.т.н. В.В.Лебедев

Тросовые системы – это новый вид космических аппаратов (КА). Вращающиеся тросовые системы могут не только создавать искусственную гравитацию, но и запасать энергию вращения для последующего орбитального маневрирования. Энергия высвобождается после управляемого разрыва троса между частями системы. Одна часть КА получает разгонный импульс и увеличивает апогей орбиты. Другая часть, напротив, получает тормозной импульс и уменьшает перигей орбиты. Силы натяжения тросов в различных системах были изучены ранее. В этой работе начинается исследование орбитальных манёвров тросовых систем только за счёт энергии вращения, то есть без использования химического топлива. В работе изучаются движения двух вариантов тросовых систем после разрыва троса. При каких условиях можно выполнить двухимпульсный переход по схеме Гомана?

Видеоролик о работе: <https://youtu.be/BmMhtDMAIKc>

Идея работы появилась после критики традиционных конструкций космических аппаратов (КА). Сейчас всё чаще начинают применять малые КА [1]. Но в таких аппаратах нельзя разместить запас топлива даже для возвращения на Землю, не говоря о межорбитальных переходах. Возвратить КА на Землю можно без расхода топлива. В Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П.Королёва разработан проект возвращения КА с помощью качающейся тросовой системы [2]. Но если качательное движение способно перевести КА на другую орбиту, то вращение и подавно повторит то же самое. В этой работе изучаются орбитальные переходы, требующие небольшой энергетики. Например, для возвращения КА на Землю с низкой орбиты достаточно уменьшить его скорость на 80-130 м/с [3]. В традиционных КА тормозной импульс получается от тормозной двигательной установки. В качательной тросовой системе импульс получается в момент определённого относительного движения. Это же можно сделать при вращении тросовой системы. Если два груза связать тросом и раскрутить, то скорости движения будут противоположно направлены друг другу. Раскрутку грузов можно провести как в космосе, если конструкции большие, так и на Земле, если габариты обтекателя ракеты-носителя позволяют. После выведения на орбиту грузы вращаются вокруг центра масс. Если трос разорвать в момент времени, когда один груз движется в ту же сторону, что и КА, а другой против, то первый груз получит разгонный импульс, а второй тормозной. При этом используется запасённая энергия вращательного движения. В работе предполагается, что тормозная скорость для возвращаемого КА равна 100 м/с. При таком условии даже пилотируемый аппарат может быть возвращён с орбиты [4]. Но тогда появилась задача о движении второго груза, ушедшего на эллиптическую орбиту с увеличенным апогеем. Какова будет его орбита? Можно ли будет маневрировать далее? Ответам на эти вопросы посвящена исследовательская работа. Расчётные формулы взяты из книги С.А.Мирера [4].

Самая простая тросовая система состоит из двух одинаковых грузов, связанных абсолютно гибким тросом. Трос предполагается невесомым. Это означает, что масса троса намного меньше массы грузов. Тросовая система закручивается на Земле или в космосе на орбите. Способ закрутки системы в этой работе не изучается, но является вполне осуществимым в современных условиях. Например, при орбитальной раскрутке большой тросовой системы для получения относительной скорости вращения грузов достаточно иметь радиус 100 метров, то есть трос длиной 200 м, и угловую скорость вращения 1 рад/с, то есть около 60 град/с. При разрыве троса в момент, когда скорость одного груза направлена против скорости орбитального движения центра масс системы, этот груз получит торможение 100 м/с. Этого достаточно для безопасного возвращения КА на Землю. Суть манёвра торможения заключается в сообщении тормозного импульса в точке апогея. Тогда высота перигея уменьшится. Если перигей находится в атмосфере Земли, то аппарат возвращается, как возвращаются космонавты. Цель достигнута, но остался второй груз, который можно применить для других целей на другой орбите. Появилась задача определения орбиты груза, получившего разгонный импульс. Для решения этой задачи были применены реальные исходные данные: высота начальной круговой орбиты $h_1=200$ км, дополнительная разгонная скорость сонаправлена со скоростью центра масс до разрыва троса и равна $dV_1=100$ м/с. Такую скорость можно получить на Земле раскруткой грузов под обтекателем ракеты при небольших размерах конструкции, то есть для малых КА. Например, при радиусе 1 метр нужна будет угловая скорость 100 рад/с – это приемлемо только

для беспилотных малых КА. Если конструкцию постепенно раскручивать в космосе, например, энергией от солнечных батарей и малых электрореактивных двигателей, то при радиусе 100 метров достаточно угловой скорости 1 рад/с. Для заданной дополнительной скорости 100 м/с надо определить высоту апогея эллиптической орбиты второго груза или новой вращающейся связки $m+M$. Из работ [4,5] были взяты расчётные формулы. На рис.1 слева показана схема первого орбитального перехода груза, получившего разгонный импульс. Расчёты по формулам можно упростить, применив табличный редактор Microsoft Excel. Применяются законы сохранения импульса P и момента импульса L . Первый груз затормозился и вернулся на Землю. Второй груз перешёл на эллиптическую орбиту. Закономерен вопрос о более высокой круговой орбите. Можно ли перевести второй груз с эллиптической орбиты на круговую, но более высокую, чем первая? Это известная схема Гомана для орбитального маневрирования, причём самого экономичного [4]. В традиционных КА такое маневрирование выполняется с помощью ракетных двигателей.

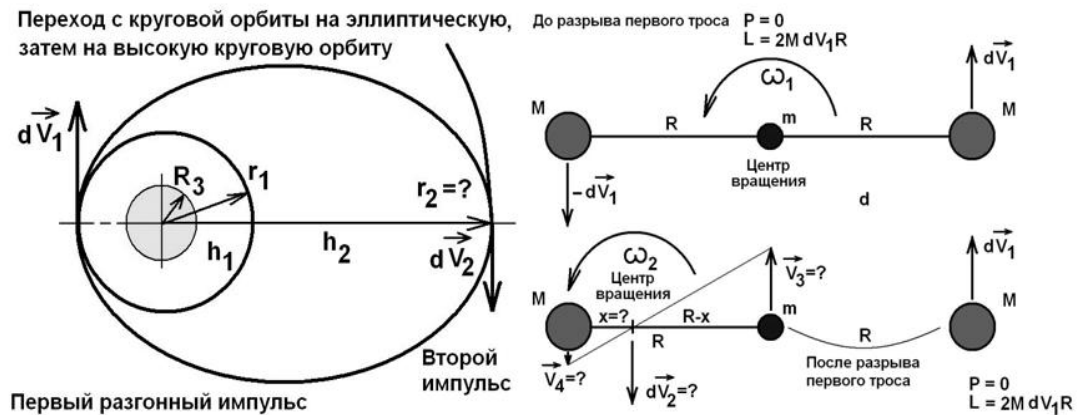


Рис. 1. Орбитальный переход по схеме Гомана вращающимися тросовыми системами

Целью работы является отказ от топлива и замена химической энергии совершенно другим видом – энергией вращения тел. Сначала надо определить вторую разгонную скорость второго груза в точке апогея. Для этого применены формулы из той же книги [4]. Но теперь нужно воспользоваться формулой для определения второй разгонной скорости dV_2 в апогее новой эллиптической орбиты:

$$dV_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2} \left(1 - \sqrt{\frac{2r_1}{r_1 + r_2}} \right)}, \text{ где } \mu - \text{ гравитационный параметр Земли, } r_1 \text{ и } r_2 - \text{ радиусы начальной и конечной круговых орбит соответственно.}$$

Конкретный практический пример остался прежним. К скорости dV_1 предъявлено требование $dV_1=100$ м/с, связанное с безопасным возвращением первого груза на Землю с орбиты высотой $h_1=200$ км над поверхностью Земли. Первый груз вернулся на Землю, а вторая часть системы, то есть два груза M и m , вращающиеся на втором тросе, перешли на эллиптическую орбиту с апогеем $h_2=349$ км над поверхностью Земли. У этих двух грузов, как новой вращающейся тросовой системы, есть запас вращательной энергии, которую можно использовать для дальнейшего маневрирования после разрыва второго троса. Появилась следующая задача. Как выполнить в апогее второй импульс для перевода КА, а точнее, одного груза, на высокую круговую орбиту? При проведении тестового расчёта оказалось, что груз M обязательно должен быть больше груза m , но на круговую орбиту надо переводить более лёгкий груз m . Тросовая система из трёх грузов позволила один груз вернуть на Землю после тормозной скорости 100 м/с, а на эллиптическую орбиту перевести два вращающихся груза, связанных вторым тросом. Массы грузов различны, обозначены буквами M и m . Вращение связанных грузов происходит вокруг общего центра масс, поэтому линейные скорости грузов различны. До этого момента массы M и m грузов предполагались произвольными. Теперь появилась очередная задача. Надо так подобрать соотношение масс M и m грузов, чтобы один из них при вращении имел линейную скорость вращения относительно центра масс, точно соответствующую второму импульсу в схеме Гомана. В рассмотренном примере эта скорость равна 98,7 м/с, но с тремя грузами эта скорость будет другой, потому что высота апогея изменилась (уменьшилась). В такой системе надо выполнить управляемый разрыв троса. Управляемый, потому что трос должен быть разорван в тот момент в апогее, когда

относительная скорость вращения dV_2 груза сонаправлена со скоростью движения центра масс вращающейся тросовой системы по орбите. После разрыва троса этот груз m получит требуемую добавочную скорость и перейдёт на высокую круговую орбиту. При этом другой груз M затормозится и останется на орбите как космический мусор, подобно отработанным межорбитальным буксирам. Тросы имеют малую массу, поэтому могут быть убраны в КА.

Отношение M/m масс грузов определяется формулой и зависит от отношения дополнительных скоростей dV_2/dV_1 . Дополнительная скорость dV_1 задана, в расчётном примере она равна 100 м/с. Однако вторая дополнительная скорость dV_2 в апогее эллипса зависит от искомого отношения M/m масс грузов. Получился замкнутый логический круг. Для определения отношения масс M/m надо знать вторую дополнительную скорость dV_2 , но для определения второй дополнительной скорости dV_2 надо знать отношение масс M/m . Для решения такой «замкнутой» задачи был применён ручной итерационный метод. Итерации – это подбор отношения масс M/m , причём ручным способом, до тех пор, пока не будет выполнено

$$\text{равенство } \frac{M}{m} = \frac{dV_2}{dV_1 - dV_2}.$$

Выводы.

1. Космическая тросовая система с тремя грузами позволяет выполнить манёвр Гомана для перевода КА с низкой круговой орбиты на высокую.
2. Химическое топливо не требуется, используется только энергия вращения системы.
3. Раскрутить небольшую тросовую систему с малыми КА можно на Земле под обтекателем перед стартом ракеты-носителя, для больших конструкций раскрутку можно выполнять только в космосе на орбите, затратив топливо, следующие манёвры не требуют химического топлива.
4. Разработана программа Microsoft Excel расчёта манёвра Гомана, выполнен тестовый расчёт тросовой системы с тремя грузами: высота начальной круговой орбиты 200 км, конечной круговой орбиты 344 км, первый возвращаемый на Землю груз получает торможение 100 м/с на низкой круговой орбите после разрыва первого троса, во второй вращающейся связке двух грузов 1/78 часть массы переводится на высокую круговую орбиту скоростью 97,5 м/с, полученной от вращения второй части системы после разрыва второго троса.
5. Перспектива – изучение других вариантов тросовых систем.
6. Подана заявка на патент на изобретение «Способ межорбитального маневрирования космического аппарата» [7].

Литература

1. *Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Урлич Ю.М.* Глобальные проблемы человечества и космос. – М.: Изд. МАКД, 2010. – 570 с.
2. *Осипов В.Г., Шошунов Н.Л.* Космические тросовые системы: история и перспективы / Земля и Вселенная. Космонавтика. – Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва. № 4, 1998.
3. *Микрин Е.А., Комарова Л.И., Орловский И.В., Евдокимов С.Н., Лукашевич А.И.* Особенности бортового баллистико-навигационного обеспечения спуска в системе управления транспортного пилотируемого корабля «Союз ТМА», Пробл. управл., 2010, выпуск 6. С. 58 – 63.
4. *Мирер С.А.* Механика космического полёта. Орбитальное движение. Учебное пособие. Ч. 2. – М.: МФТИ (НИУ), 2013.
5. *Астрономические постоянные.* [Электронный ресурс]. URL: http://www.sai.msu.ru/neb/rw/cm_const.htm (дата обращения 21.12.2021).
6. *Екимовская А.А.* 10 класс. Механика космических тросовых вращающихся систем. X Международный конкурс научно-исследовательских работ учащихся. – М.: РАЕ, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://school-science.ru/10/11/45529> (дата обращения 21.12.2021).
7. *Екимовская А.А.* Применение табличного редактора Microsoft Excel для решения задачи о космической тросовой вращающейся системе / Научно-методическое издание: Материалы XXXI конференции "Современные информационные технологии в образовании". Ред. группа: Алексеев М.Ю. и др. - Фонд новых технологий в образовании "БАЙТИК", ИТО-Троицк-Москва, 2-3.07.2020. – 572 с. - ISBN 978-5-89513-468-9. - С.507 – 511. [Электронный ресурс]. URL: <https://lk-ito.bytic.ru/uploads/files/materials.pdf> (дата обращения 21.12.2021).
8. *Екимовская А.А.* Способ межорбитального маневрирования космического аппарата. Заявка на патент на изобретение RU № 2021126157, приоритет 06.09.2021.