

ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В настоящее время, актуальным является вопрос использования тросовых систем для осуществления безрасходных транспортных операций в космосе. Рассматривается задача спуска малой капсулы с орбиты на тросе. Капсула отбрасывается от базового космического аппарата (КА) вертикально вниз и переводится на более низкую орбиту при помощи троса, что создает приращение скорости позволяющее капсуле перейти на траекторию спуска. Такой орбитальный маневр позволяет осуществлять доставку грузов с орбиты без расхода топлива.

Рассматривается орбитальная тросовая система (ОТС) с не проводящим электрический ток тросом и механизмом развертывания, позволяющим лишь уменьшать или увеличивать натяжение в тросе. Использование механизма смотки (уменьшения длины выпущенного участка троса) не предполагается. Измеряемыми параметрами движения ОТС являются длина размотанного троса, скорость его размотки и натяжение.

Процесс размотки разбит на три участка. Первый участок предполагает отвод субспутника от базового КА на некоторое расстояние и стабилизацию связки в окрестности линии местной вертикали. На данном этапе важным является безопасность КА, так как возможно запутывание троса вокруг деталей его конструкции. На втором участке трос полностью разматывается и субспутник под действием кориолисовой силы отклоняется на максимальный угол от линии местной вертикали в направлении орбитального движения центра масс ОТС. Третий участок – участок маятникового движения в направлении местной вертикали в плоскости орбиты, что обеспечивает дополнительную скорость, которую можно интерпретировать как аналог тормозного импульса, выдаваемого тормозной двигательной установкой при обычном спуске с околоземной орбиты.

Относительное движение центров масс КА и субспутника может быть описано в сферической системе координат (рис. 1).

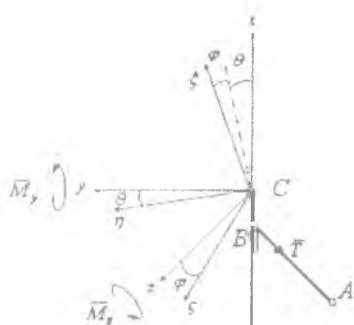


Рис. 1. Сферическая система координат

На рисунке C – центр масс КА, B – точка крепления троса к КА, A – центр масс субспутника, \vec{T} – вектор силы натяжения троса, \vec{M}_y , \vec{M}_z – векторы моментов силы натяжения троса, действующие относительно оси CY и CZ соответственно. Система координат $CXYZ$ связана с центром масс КА. Точка B лежит на оси CX .

Было проведено исследование начального участка развертывания тросовой системы (от 0 до 1500 метров) при возникновении внезапного заедания троса в процессе его размотки. В случае заедания размотка троса полностью прекращается, в результате чего сила натяжения троса почти мгновенно возрастет, трос растягивается, субспутник отскакивает и начинает движение в противоположном направлении в сторону КА. Следствием этого может стать удар субспутника о КА.

Наиболее критичным с точки зрения безопасности является начальный участок развертывания ОТС. В начальные моменты развертывания может произойти заедание троса в тормозном механизме. В этом случае капсула может ударить КА или может произойти заматывание троса вокруг него. При помощи симулятора TDS, созданного на кафедре динамики полета СГАУ, было проведено моделирование этой внештатной ситуации. В результате были выявлены два наиболее опасных участка развертывания ОТС:

- "удар". капсула после заедания троса ударяет КА, (рис. 2), наиболее опасный участок;
- "заматывание", капсула после заедания троса движется по сложной траектории (рис. 3), возможно заматывание троса вокруг КА.



Рис. 2. Капсула после заедания троса ударяет базовый аппарат

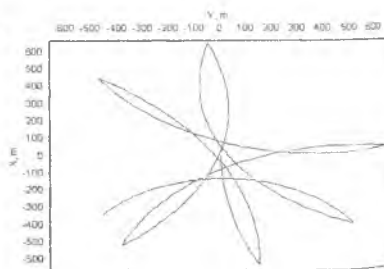


Рис. 3. Капсула после заедания троса движется по сложной траектории

Границы участков зависят от конкретных параметров ОТС.

Для выяснения возможной величины возникающей силы натяжения \vec{T} и соответствующих моментов \vec{M}_y , \vec{M}_z было проведено моделирование. Предполагалось, что

материал троса эластичный и его растяжение описывается по закону Гука. Абсолютные значения моментов силы натяжения относительно осей связанной системы координат описываются выражениями:

$$|M_y| = |T l_0 \cos \theta \sin \varphi|, \quad |M_z| = |T l_0 \cos \theta \sin \theta|, \quad (1)$$

где l_0 – расстояние от центра масс КА до точки подвеса троса (прямая CB на рис. 1).

При моделировании не учитывалось влияние диссипации энергии в волокнах троса за счет внутреннего трения. Это позволяет определить максимальное значение силы натяжения, возникающей при растяжении троса в момент резкой остановки его размотки. КА считается неподвижным. В качестве материала троса при моделировании выбран 8х200 Дупеета ($E=26,483$ ГПа). Моделирования проводились для случая номинального развертывания – когда субспутник отбрасывается вертикально вниз ($\theta_0 = 0, \varphi_0 = 0$), и при наличии ошибок начальных условий ($\theta_0 = -45^\circ, \varphi_0 = 45^\circ$). Верхние кривые на рис. 2 и 3 соответствуют случаю, при котором начальная скорость отбрасывания субспутника равна 5 м/с, нижние соответствуют начальной скорости 3 м/с.

Рисунок 4 иллюстрирует величину максимальной нагрузки на точку подвеса троса в момент заедания в зависимости от длины размотанного участка троса. Был сделан вывод о том, что величина натяжения троса в момент заедания слабо зависит от ошибок начальных условий (кривые практически совпадают), но существенно зависит от скорости отбрасывания субспутника.

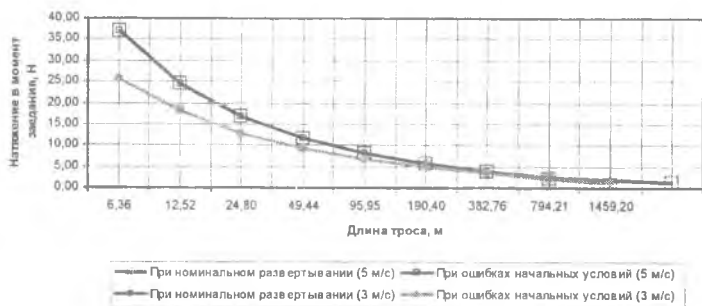


Рис. 4. Пиковая нагрузка на точку подвеса троса к КА в момент заедания

На рисунке 5 показаны величины моментов \bar{M}_y, \bar{M}_z , возникающих в случае резкого прекращения размотки троса. Из рисунка видно, что величина моментов, действующих в точке подвеса троса, слабо зависит от начальных условий и существенно зависит от начальной скорости субспутника.

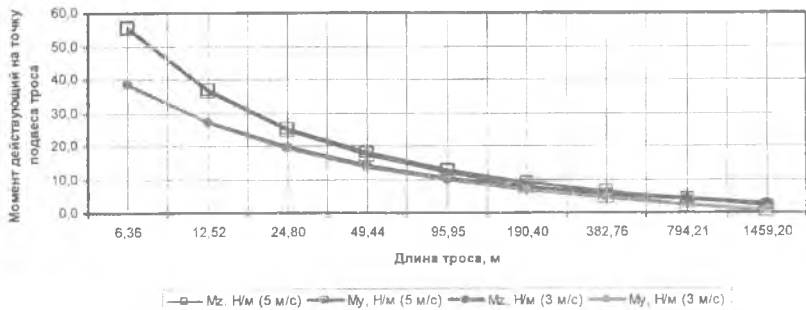


Рис. 5. Моменты силы натяжения действующие на КА в момент заедания

При выполнении развертывания, после прохождения начального участка (0 – 1500 м) существует достаточно большой участок (участок активного разматывания катушки 16000 – 28000 м), на котором при заедании троса на точку подвеса будет действовать большая сила натяжения, чем при штатном развертывании. Рисунок 6 иллюстрирует величину максимальной нагрузки на точку подвеса троса в момент заедания в зависимости от длины размотанного троса для этого участка.

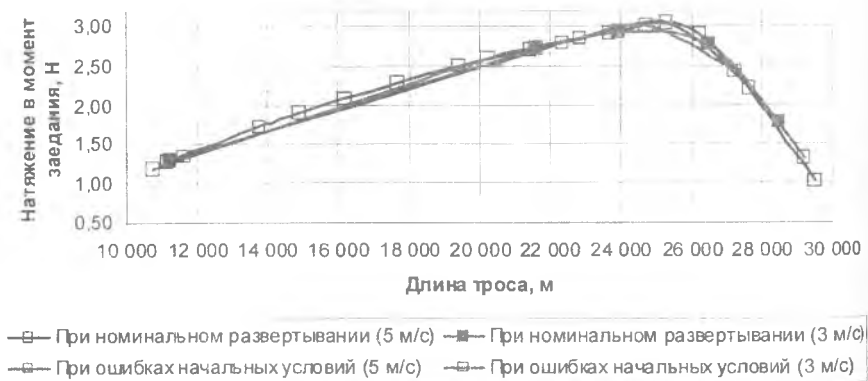


Рис. 6. Пиковая нагрузка на точку подвеса троса к КА в момент заедания

Для предотвращения вращения вокруг центра масс под действием рывка при заедании троса система ориентации КА должна компенсировать моменты, действующие в точке подвеса троса. Если это не может быть достигнуто, то рекомендуется установка устройства, позволяющего экстренно отрезать трос в случае возникновения заедания. Такое устройство может быть настроено на срабатывание при повышении натяжения до несколько меньшего уровня, чем небезопасное.

Библиографический список

1. Белецкий В.В. Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. Rupp C C. A Tether Tension Control Law for Tethered Satellite Deployed along Local Vertical. Marshall Space Flight Center. NASA TM X-64963, 1975.
3. Reb S, Tethered satellite systems. – Technische Universitat Munchen. – 1991.
4. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. – М.: Наука. Главная. ред. физ.-мат. лит., 1982.