

УДК 629.191

В. А. Иванов, Е. В. Ручинская,
В. С. Ручинский**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В КОСМОСЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ**

Рассмотрено применение метода математического моделирования различных режимов движения тросовых систем для выполнения транспортных операций в космосе при обслуживании КА на круговых и эллиптических орбитах.

E-mail: l_r@stmp.ru

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальная станция, привязной объект, орбитальная тросовая система, центр масс, вращение связки, ориентация, равновесный стационарный режим, траектория встречи.

Практически ни одна космическая программа не может выполняться без проведения соответствующих транспортных операций, цель которых заключается в обслуживании орбитальных станций (ОС) и других космических объектов, в доставке грузов на заданные орбиты, в сборке крупных космических конструкций и проведении определенных работ и научных исследований в окрестности ОС [1–4]. Все эти задачи могут быть объединены под общим понятием транспортного обслуживания космического аппарата (КА).

В настоящей работе приведено решение задач транспортного обслуживания в космосе с использованием тросовых систем (ТС).

В табл. 1 приведено сопоставление достоинств и недостатков выполнения транспортного обслуживания с использованием ТС. Простота и небольшая масса конструкции определяются тем, что ТС включает в себя всего три элемента: лебедку (или шпуль), трос и устройство для регулирования силы натяжения или скорости разматывания троса. Суммарная масса одноразовой ТС на основе шпули с тросом длиной 40 км составляет 35... 50 кг, а масса многоразовой ТС на основе лебедки 120... 150 кг. Это, по-видимому, значительно меньше массы реактивного двигателя с топливными баками, роль которых при реализации компланарных транспортных операций выполняет ТС, т.е. задача решается без включения двигательной установки. При многократном использовании ТС можно достичь значительной экономии топлива.

Универсальность ТС заключается в возможности применения одной и той же системы для выполнения различных межорбитальных

Достоинства	Недостатки
Простота и небольшая масса конструкции	Ограничения на параметры обслуживаемых орбит
Выполнение компланарных операций без включения двигателя	Для операций со стыковкой необходимо фазирование орбит
Возможность многократного применения	Для некомпланарных операций требуется включение двигательной установки
Универсальность	
Экологическая чистота проводимых в окрестности орбитальной станции экспериментов	
Скрытность проведения транспортных операций	

и локальных операций транспортного обслуживания различных КА. Управляемое перемещение научных моделей в окрестности ОС без использования двигательной установки обеспечивает экологическую чистоту проведения экспериментов. Выполнение транспортных операций без использования двигательной установки гарантирует скрытность проведения этих операций.

В зависимости от поставленной задачи транспортного обслуживания целесообразно использовать тот или иной режим относительного движения ТС (равновесный стационарный, колебаний или вращений вокруг центра масс). Для решения ряда задач весьма перспективен равновесный стационарный режим движения ТС, когда при движении связки она все время ориентирована по местной вертикали. В случае применения этого режима реализуется устойчивое движение связанных объектов ТС [2]. Однако обслуживание КА с нулевой относительной скоростью возможно только при его движении по эллиптическим орбитам и при определенном соотношении между параметрами ТС.

Возможности ТС для выполнения транспортных операций в космосе значительно расширяются в случае применения режимов колебаний и вращения ТС вокруг центра масс, особенно, если обслуживание КА должно осуществляться при ограничениях на относительную скорость в процессе обслуживания. В табл. 2 приведены значения относительной скорости $v_{отн}$ в процессе обслуживания КА на круговых орбитах с использованием режима колебаний ТС с амплитудой $\Delta\varepsilon$ для различных длин троса D в случае движения базового объекта (БО) связки по орбите радиусом $r_0 = 6671$ км.

Из табл. 2 следует, что при увеличении амплитуды колебаний ТС до $\Delta\varepsilon = 60^\circ$ относительная скорость в момент обслуживания КА уменьшается практически до нулевого значения. При этом обслуживание

Длина троса D , км	Относительная скорость $v_{\text{отн}}$, м/с, при использовании режима колебаний амплитудой $\Delta\varepsilon$			
	10°	30°	45°	60°
1,0	1,3895	0,7345	0,3189	0,000065
10	13,8894	7,3369	3,1830	0,006506
25	34,6991	18,3246	7,9331	0,04583
50	69,3176	36,5685	15,7855	0,161830
100	138,3155	72,8173	31,2541	0,64333

должно происходить в момент прохождения связкой вертикального положения.

Обслуживание с нулевой относительной скоростью КА, движущихся по эллиптическим орбитам, и с использованием режимов колебания и вращения ТС вокруг центра масс может быть реализовано в перигейной и апогейных точках орбиты КА.

В табл. 3 приведены характеристики ТС для обслуживания с нулевой относительной скоростью КА, движущегося по эллиптической орбите с радиусом перигея 6760 км при различных радиусах апогея $r_{A\alpha}$ для $r_0 = 6671$ км.

Таблица 3

Характеристики ТС	$r_{A\alpha}$, км				
	6780	6800	6825	6850	6900
$\nu_B = 0^\circ, D = 10$ км					
$\Omega_{\text{ор}}$	-1,0015	-0,5080	0,1127	0,7270	1,9482
$\Delta\varepsilon$, градусы	35,3243	17,0565	3,7103	24,8192	-
$\nu_B = 180^\circ$					
D , км	30	50	75	100	150
$\Omega_{\text{ор}}$	-1,6642	-1,6959	-1,7103	-1,7164	-1,7209
$\Delta\varepsilon$, градусы	-	-	-	-	-

В табл. 3 введены следующие обозначения: ν_B — значение угла истинной аномалии орбиты КА, при котором происходит обслуживание аппарата; $r_{A\alpha}$ — радиус апогея орбиты КА; D — длина троса; $\Omega_{\text{ор}} = \dot{\varepsilon}/n$ — безразмерная угловая скорость вращения ТС в момент прохождения связкой вертикального положения; $\dot{\varepsilon}$ — угловая скорость вращения связки относительно орбитальной системы координат; n — средняя орбитальная угловая скорость движения КА по орбите; $\Delta\varepsilon$ — амплитуда колебаний ТС, соответствующая требуемому значению $\Omega_{\text{ор}}$.

Прочерки в строке $\Delta \varepsilon$ означают, что в данном случае обслуживание КА осуществляется в режиме вращения ТС вокруг центра масс.

Выигрыш в энергетике за счет транспортного обслуживания КА с использованием ТС в работе оценивали значением характеристической скорости $v_{\text{хар}}$ и массой экономии топлива $m_{\text{т}}$. Величину $v_{\text{хар}}$ определяли значением той характеристической скорости, которая потребовалась бы обычному маневрирующему аппарату для выполнения аналогичной задачи транспортного обслуживания. Используя формулу Циолковского [4], получили выражение для определения экономии топлива с учетом массы $m_{\text{п}}$ объекта связки, который осуществляет решение задачи обслуживания, и принимая во внимание основные характеристики гипотетического маневрирующего аппарата.

В табл. 4 приведены результаты расчетов выигрыша в энергетике за счет использования ТС для “мягкого” обслуживания КА на круговых орбитах при $r_0 = 6671$ км и $m_{\text{п}} = 5000$ кг.

Таблица 4

r_A , км	D , км	$v_{\text{хар}}$, М/с	$m_{\text{т}}$, кг		
			$N = 1$	$N = 5$	$N = 10$
6690	19	10,98	18,34	91,70	183,40
6710	39	22,50	37,64	188,18	376,30
6740	69	39,67	65,43	327,13	654,25

В табл. 4 обозначено: r_A — радиус орбиты обслуживаемого КА, N — число операций обслуживания.

Результаты расчетов показывают, что благодаря использованию ТС для выполнения транспортных операций достигается существенное уменьшение энергетических затрат в сравнении с обычными средствами решения этой задачи маневрирующими аппаратами. Выигрыш в энергетике возрастает с увеличением радиуса обслуживаемых орбит и увеличением массы объекта, решающего задачу обслуживания. Многократное обслуживание соответственно увеличивает выигрыш в энергетике. Следует иметь в виду, что масса системы обслуживания уменьшается больше, чем масса сэкономленного топлива $m_{\text{т}}$, так как масса самой ТС меньше массы двигательной установки вместе с топливными баками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е л к и н К. С., Ф е д о р о в С. Б., Д а н и л е н к о А. В., Л я г у ш и н а С. Ц. Использование орбитальных тросовых систем для реализации транспортных и стыковочных операций // Тез. докл. V Междунар. аэрокосм. конгресса. УАС'06. – М., 2006. – С. 321.

2. Иванов В. А., Купреев С. А., Ручинский В. С. Динамика полета и математическое моделирование орбитального функционирования системы связанных космических объектов. – М.: Изд-во Росс. гос. техн. ун-та им. К.Э. Циолковского, 2008. – 200 с.
3. Сидоров И. М. Предложения о построении группировки космических объектов, предназначенных для решения транспортных и энергетических задач // Космические исследования. – 2004. – Т. 42, № 1. – С. 63–75.
4. Иванов В. А., Ручинская Е. В. Методика определения эффективности различных режимов движения орбитальных тросовых систем для сближения в космосе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2009. – № 4. – С. 37–44.
5. Полет космических аппаратов. Примеры и задачи / Ю.Ф. Авдеев, А.Н. Беляков, А.В. Брыков и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

Статья поступила в редакцию 26.11.2009

Виталий Александрович Иванов родился в 1929 г., окончил Военно-инженерную академию им. Ф.Э. Дзержинского в 1954 г. Д-р техн. наук, профессор МАТИ, ученый секретарь Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН), действительный член РАРАН, почетный академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Автор более 100 научных работ и 4 монографий в области авиации и космонавтики.

V.A. Ivanov (b. 1929) graduated from the Military Engineering Academy n.a. F.E. Dzerzhinskii in 1954. D. Sc. (Eng.), professor of the Moscow Aviation and Technology Institute, member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Honorary academician of the Russian Academy of Cosmonautics n.a. K.E. Tsiolkovskii. Author of more than 100 publications and 4 monographs in the field of aviation and spaceflight.

Елена Валерьевна Ручинская окончила в 2001 г. МИЭМ. Аспирантка МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского. Автор 20 научных работ в области математического моделирования.

Ye.V. Ruchinskaya graduated from the Moscow Institute of Electronic Engineering in 2001. Post-graduate of the MATI–Russian State Technical University n.a. K.E. Tsiolkovskii. Author of 20 publications in the field of mathematical simulation.

В.С. Ручинский родился в 1943 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1968 г. Чл.-корр. Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Автор более 200 научных работ в области авиации и космонавтики.

V.S. Ruchinskii (b. 1943) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1968. Corresponding member of the Russian Academy of Cosmonautics n.a. K.E. Tsiolkovskii. Author of 200 publications in the field of aviation and cosmonautics.