

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗВОРОТОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ПОСЛЕ ГОДА ШТАТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.А. Прутько

ПАО «РКК «Энергия»

Россия, 141070, Королев, Ленина ул., 4а

E-mail: aleksey.prutko1@rsce.ru

Ключевые слова: Международная космическая станция, оптимальный разворот, космический аппарат, орбитальная станция, управление угловым движением.

Аннотация: В работе представлены результаты внедрения в штатную эксплуатацию оптимальных по расходу топлива разворотов Международной космической станции (МКС) на двигателях ориентации под управлением российского сегмента. Необходимо было разработать методику выполнения оптимальных разворотов МКС таким образом, чтобы специалисты центра управления полетами (ЦУП) могли самостоятельно планировать и выполнять требуемые развороты без необходимости включения специалистов систем управления движением и навигации, которые разрабатывали, как и бортовое программное обеспечение, так и сами оптимальные траектории разворотов МКС. С момента внедрения в штатную эксплуатацию было выполнено не менее десяти оптимальных разворотов МКС.

1. Введение

С 2017 по 2019 года специалистами ПАО «РКК «Энергии» проводился космический эксперимент «МКС-Разворот», целью которого являлось создание и апробация альтернативных алгоритмов выполнения разворотов МКС [1-4]. Типичными разворотами МКС являются: разворот вокруг оси рысканья на 180° в орбитальной системе координат [5] и обратный разворот, проводимые для обеспечения светотеневых условий перед и после стыковок российских кораблей. В ходе реализации космического эксперимента был разработан и введен в состав бортового программного обеспечения МКС программный компонент отслеживания заданной траектории. Космический эксперимент был успешно завершен, и проведение оптимальных по расходу топлива разворотов МКС методом отслеживания заданной траектории было внедрено в штатную эксплуатацию МКС. В ходе проведения эксперимента было продемонстрировано сокращение расхода топлива на типичный разворот до 5-10 кг вместо 50-60 кг. После стыковки Многоцелевого лабораторного модуля «Наука» и узлового модуля «Причал» в 2021 году строительство российского сегмента было завершено. В связи с этим массово-инерционные характеристики в дальнейшем не должны существенно измениться. Было предложено разработать перечень оптимальных траекторий разворотов для типовых переориентаций МКС, которым специалисты ЦУП могли бы пользоваться в течение продолжительного времени эксплуатации МКС. В этой работе представлены результаты проведенной работы.

2. Разработка оптимальных траекторий разворотов МКС

Поскольку строительство МКС на текущий момент считается завершенным, то изменение массово-инерционных характеристик зависит от пристыкованных грузовых и транспортных кораблей: транспортный пилотируемый корабль «Союз МС», транспортный грузовой корабль «Прогресс МС», американские Cygnus, SpaceX Dragon и Dragon Crew, японский HTV. Различные всевозможные комбинации пристыкованных кораблей к различным стыковочным узлам приводят к сотням разных конфигураций МКС. Поскольку космические корабли стыкуются к МКС в основном в одной плоскости – плоскости орбиты, то от этого равновесная ориентация МКС изменяется практически только по тангажу. Таким образом, все конфигурации были усреднены в восемь конфигураций с отстоящими друг от друга равновесными ориентациями примерно в полтора градуса. Перечень конфигураций МКС представлен в таблице 1. Перечень равновесных ориентаций, соответствующих конфигурациям МКС, в положениях «на разгон» и «на торможение» представлен в таблице 2.

Таблица 1. Усредненные конфигурации МКС для разработки оптимальных траекторий разворотов. J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} – диагональные элементы тензора инерции МКС, J_{xy} , J_{xz} , J_{yz} – центробежные моменты инерции МКС с отрицательным знаком. Размерность моментов инерции – кг·м².

	J_{xx}	J_{yy}	J_{zz}	J_{xy}	J_{xz}	J_{yz}
K1	142256416	191330160	81546568	10711161	4356336	443796
K2	142046336	194799904	84795616	9930085	4320057	441938
K3	141949632	198996912	88879448	9062321	4292516	446268
K4	141505888	200807872	90237440	7753397	4268089	456441
K5	139817120	199651968	87399136	6092651	4205908	520286
K6	138726720	199555600	86213552	4494287	4157578	556886
K7	138701456	200945728	87570016	3004080	4133860	549067
K8	138723136	201136112	87782240	1443159	4114245	530280

Таблица 2. Равновесные ориентации МКС для конфигураций МКС из таблицы 1. Равновесные ориентации представлены в углах Крылова в последовательности рысканье-тангаж-крен в градусах.

	В положении «на разгон»			В положении «на торможение»		
	Рысканье	Тангаж	Крен	Рысканье	Тангаж	Крен
K1	-176.0	11.47	-0.85	4.0	11.08	-0.85
K2	-176.0	10.11	-0.85	4.0	9.74	-0.85
K3	-176.0	8.7	-0.85	4.0	8.34	-0.85
K4	-176.0	7.27	-0.85	4.0	6.92	-0.85
K5	-176.0	5.76	-0.85	4.0	5.41	-0.85
K6	-176.0	4.29	-0.85	4.0	3.94	-0.85
K7	-176.0	2.9	-0.85	4.0	2.56	-0.85
K8	-176.0	1.52	-0.85	4.0	1.18	-0.85

Для представленных конфигураций МКС и соответствующим равновесным ориентациям специалистами разработчиков программного обеспечения систем управления движением и навигации были получены оптимальные по расходу топлива траектории разворотов для типовых разворотов МКС из положения «на разгон» в положение «на торможение» и обратно длительностью 5500 секунд. Были получены шестнадцать траекторий переориентаций МКС, которых должно хватить на ближайшие годы эксплуатации. Все траектории были отработаны на наземном комплексе

отработки [6] при использовании всех допустимых конфигураций двигателей и были допущены к штатной эксплуатации.

Таким образом, специалистам ЦУП необходимо в общих чертах выполнить следующие шаги:

- заблаговременно выбрать необходимую траекторию разворота, которая наиболее близка к начальной равновесной ориентации МКС из таблицы 2, и загрузить в бортовую память;
- начать выполнение разворота методом отслеживания заданной траектории и дождаться окончания разворота;
- выполнить доворот МКС в дежурную ориентацию стандартным способом по кратчайшей траектории.

3. Результаты выполнения оптимальных разворотов МКС

С момента введения оптимальных по расходу топлива разворотов МКС в штатную эксплуатацию было выполнено не менее десяти разворотов. Их результаты по расходу топлива представлены в таблице 3. Все развороты были выполнены успешно и без замечаний. Все результаты по расходу топлива составляют менее восьми килограмм на разворот.

Таблица 3. Результаты выполнения оптимальных по расходу топлива разворотов МКС за 2022 и 2023 годы. Разворот из положения «на разгон» в положение «на торможение» обозначен как прямой, и из положения «на торможение» в положение «на разгон», соответственно, как обратный.

Дата	Тип	Направление	Расход топлива, кг
21.09.2022	К3	Прямой	7.28
27.10.2022	К5	Прямой	6.58
28.10.2022	К6	Обратный	4.03
19.02.2023	К5	Обратный	3.75
25.02.2023	К5	Прямой	6.12
26.02.2023	К6	Обратный	4.38
24.05.2023	К4	Прямой	4.94
25.05.2023	К4	Обратный	4.1
15.09.2023	К3	Прямой	5.04
16.09.2023	К3	Обратный	4.09

4. Заключение

Для штатной эксплуатации были разработаны шестнадцать траекторий для выполнения оптимальных по расходу топлива разворотов МКС. Из них восемь из положения «на разгон» в положение «на торможение» и обратно. Траектории были разработаны на основе восьми усредненных конфигурациях МКС, учитывающих различные комбинации пристыкованных кораблей посещения. Специалисты ЦУП могут использовать предложенный перечень траекторий для выполнения разворотов МКС в ближайшие годы эксплуатации. За 2022 и 2023 годы были успешно проведены оптимальные развороты МКС, обеспечившие благоприятные условия для стыковки и расстыковки космических кораблей.

Список литературы

1. МКС-Разворот / АО «ЦНИИмаш». https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-isrs/cnts/experiments/mks_razvorot/ (дата обр. 20.01.2024).
2. Прутько А.А., Атрошенко С.Н., Богачев А.В., Старченко А.Е. Использование псевдоспектрального метода для поиска траекторий оптимальных по расходу топлива разворотов Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2019. № 4. С. 121-133.
3. Атрошенко С.Н., Прутько А.А., Крылов А.Н. и др. Моделирование сил и моментов сил набегающего потока атмосферы в целях верификации динамических режимов системы управления движением и навигации МКС и синтеза оптимального управления // Космическая техника и технологии. 2017. № 4. С. 72-88.
4. Прутько А.А. Результаты проведения маневров крупногабаритной орбитальной станции по траекториям, оптимизирующим расход топлива // Сборник материалов всероссийской молодежной научно-практической конференции «Орбита молодежи-2019». СанктПетербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2019. С. 130-132.
5. Борисенко Н.Ю., Сумароков А.В. Об ускоренном построении орбитальной ориентации грузовых и транспортных кораблей серий «Союз МС» и «Прогресс МС» // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 5. С. 131-141.
6. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 245 с.