

МЕТОДИКА УЧЁТА ФАКТОРА НАДЁЖНОСТИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ДОСТАВКИ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ, ИНСТРУМЕНТОВ И ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ОРБИТАЛЬНУЮ ПИЛОТИРУЕМУЮ СТАНЦИЮ

© 2023

И. В. Железнов аспирант кафедры космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; инженер; Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв; zheleznov.ilia2016@yandex.ru

Р. А. Уперчук аспирант кафедры космического машиностроения имени Генерального конструктора Д. И. Козлова; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; инженер; Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв; uperchuk.roman@yandex.ru

В. К. Ерошенко инженер; Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв; post@rsce.ru

Рассмотрены основные аспекты развёртывания многомодульных орбитальных пилотируемых станций. Проанализирована методика планирования доставки запасных частей, инструментов и принадлежностей, используемая для Международной космической станции. Показано, что её применение связано с постановкой задачи математического программирования с большим количеством переменных, что осложняет процесс поиска оптимального варианта планирования с точки зрения экономической эффективности. Транспортные операции на национальные орбитальные пилотируемые станции осуществляются с меньшей частотой по сравнению с Международной космической станцией, что обусловлено большими затратами на запуски транспортных кораблей с учётом возникновения нештатных ситуаций. Предложен подход к усовершенствованию методики планирования доставки запасных частей, инструментов и принадлежностей для возможности применения на национальных орбитальных пилотируемых станциях, заключающийся в учёте фактора надёжности. Преимуществом усовершенствованной методики является упрощение процесса планирования транспортных операций без применения методов математического программирования. Усовершенствованная методика отличается наглядностью и простой пошаговой реализацией.

Орбитальная пилотируемая станция; транспортная система; фактор надёжности; нештатная ситуация; запасные части, инструменты и принадлежности; средняя наработка на отказ

Цитирование: Железнов И.В., Уперчук Р.А., Ерошенко В.К. Методика учёта фактора надёжности при планировании доставки запасных частей, инструментов и принадлежностей на околоземную орбитальную пилотируемую станцию // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 71-77. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-71-77

Введение

В настоящее время мировая тенденция развития пилотируемой космонавтики направлена на создание многомодульных орбитальных станций с возможностью технического обслуживания, в том числе модернизации. Транспортная система такого типа

пилотируемой инфраструктуры нацелена на систематические полёты в периоды развёртывания орбитальной пилотируемой станции (ОПС) и целевого использования.

Развёртывание функционального ядра ОПС является особенно важным этапом жизненного цикла станции. При планировании транспортных операций в этот период необходимо учитывать возможность возникновения различных нештатных ситуаций (НШС), а именно:

- на этапе подготовки, старта и выведения транспортного корабля/модуля: авария ракеты-носителя (РН) с транспортным кораблём/модулем на стартовом комплексе, авария РН с транспортным кораблём/модулем на этапе выведения;
- в ходе эксплуатации ОПС: отказы в штатных бортовых системах модулей ОПС, невозможность проведения коррекции орбиты, поддержания и построения ориентации орбитальной станции, НШС в ходе проведения внутрикорабельной и внекорабельной деятельности экипажа.

Основным методом парирования вышеуказанных НШС является резервирование оборудования бортовых систем модулей ОПС и использование запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП), которые доставляются в процессе транспортных операций на ОПС.

При планировании транспортных операций учитывается, что:

- ЗИП подразделяются на хранимые на борту ОПС и на хранимые на Земле, исходя из степени критичности отказа с точки зрения безопасности экипажа и ОПС;
- в первую очередь доставляются хранимые на борту ЗИП для парирования НШС, связанных с отказами критически важных систем модулей ОПС;
- восполнение бортовых ЗИП планируется после НШС (отказ в бортовой системе) с помощью доставки ЗИП из состава хранимых на Земле на ближайшем пилотируемом или грузовом транспортном корабле (в зависимости от технических возможностей);
- количество ЗИП определяется исходя из назначенного ресурса и интенсивности отказа оборудования, а также с учётом располагаемых объёмов хранения на орбитальной станции. Также следует отметить, что ЗИП имеет назначенный срок хранения, который зависит от множества факторов, в том числе от условий хранения.

На Международную космическую станцию (МКС) доставка грузов, в том числе ЗИП, осуществляется несколькими транспортными системами, что является сложной задачей с точки зрения планирования, так как необходимо одновременно учитывать интересы многих сторон-участников [1]. В то же время парирование НШС, связанных с потерей необходимых грузов во время транспортных операций, может быть осуществлено партнёрами по договорённости.

При создании национальной ОПС предполагается, что транспортные операции к ней будут осуществляться преимущественно с помощью национальной транспортной системы, в состав которой входят пилотируемый и грузовой транспортные корабли.

Транспортный грузовой корабль (ТГК), на примере «Прогресс МС» [2], выполняет следующие функции:

- доставка расходуемых материалов для обеспечения жизнедеятельности экипажа и проведения целевых работ;
- утилизация с ОПС отходов;
- дозаправка станции топливом;
- проведение коррекции орбиты, построение и поддержание ориентации ОПС.

Пилотируемый транспортный корабль (ПТК) выполняет следующие функции:

- обеспечение жизнедеятельности экипажа на этапе автономного полёта и доставка экипажа на ОПС;

- доставка расходуемых материалов для обеспечения жизнедеятельности экипажа и проведения целевых работ;
- возвращение целевого оборудования на Землю.

Транспортные операции на национальные ОПС осуществляются с меньшей частотой по сравнению с МКС, что обусловлено колоссальными затратами на запуски транспортных кораблей с учётом возникновения НШС. Это осложняет применение существующей методики планирования доставки ЗИП в связи со сложностью учёта различных факторов в математической модели грузопотока. Следствием этого является необходимость постановки задачи математического программирования с большим количеством переменных, решение которой не всегда является оптимальным с точки зрения экономической эффективности.

Целью настоящей статьи является усовершенствование методики планирования доставки ЗИП для возможности применения на национальных ОПС, заключающееся в учёте фактора надёжности и позволяющее упростить процесс поиска экономически эффективного решения.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

- выявление критичных элементов систем модулей ОПС;
- расчёт минимального значения средней наработки на отказ критичных элементов модулей ОПС;
- группировка комплектов ЗИП в соответствии с минимальным значением при помощи план-графика;
- расчёт массы ЗИП для каждой из экспедиций на планируемый период эксплуатации ОПС.

Методика планирования доставки запасных частей, инструментов и принадлежностей на отечественную орбитальную станцию

Предполагается, что нормирование доставки ЗИП с учётом показателей надёжности позволит добиться повышения экономической эффективности транспортной системы. В качестве показателя надёжности используется средняя наработка на отказ. В дальнейших расчётах приняты следующие основные допущения:

- экспоненциальный закон распределения отказов, в связи с чем интенсивность отказов и средняя наработка на отказ постоянны [3]. Выбор экспоненциального закона обусловлен тем, что большинство отказов, связанных с составными частями и системами ОПС (например, системы управления движением и навигации, системы телефонной связи, системы бортовых измерений и т.д.), подчиняется этому закону, а также в связи со своей простотой, что обосновывает его применение в подавляющем большинстве практических расчётов надёжности изделий ракетно-космической техники [4];
- природа, масштаб и последствия отказа не учитываются, принимается, что для восстановления работы элемента требуется одинаковый объём ЗИП в количественном отношении. Таким образом, рассматривается стационарный грузопоток без учёта угрозы жизни экипажу в случае отказов;
- принимается, что элемент оборудования восстанавливается мгновенно. Время простоя и ремонта в контексте данной работы не учитывается;
- принимается, что доставка ЗИП на ОПС осуществляется мгновенно, то есть не учитывается время на полёт к ОПС одного корабля после старта и время на проведение операций по разгрузке.

Авторами предлагается усовершенствование методики планирования процессов доставки ЗИП на ОПС, исходя из средней наработки на отказ, посредством анализа план-графика (рис. 1). Обозначения, представленные на план-графике, поясняются ниже.

№	Наименование	1 10000	2 15000	3 20000	4 25000	5 30000	6 35000	7 40000	8 45000	9 50000	Ncol
1	Элемент 1 (t1=15000 ч)										
2	Элемент 2 (t2=30000 ч)										
3	Элемент 3 (t3=20000 ч)										
4	Элемент 4 (t4=10000 ч)										
5	Элемент 5 (t5=15000 ч)										
A	Элемент A (tA=10000 ч)										
N	Элемент N										
		Группа 1		Группа 2		Группа 3		Группа 4		Группа 5	N эксп

Рис. 1. Форма план-графика

В качестве исходных данных к методике выступают перечень заменяемых элементов оборудования; значения средней наработки на отказ t_i (или интенсивностей отказов λ_i); продолжительность периода, для которого осуществляется планирование; масса регулярно доставляемых ЗИП для каждого из элементов за данный период.

На этапе планирования грузопотока предлагается пошагово выполнить следующие действия:

1. Составить массив элементов оборудования, для обеспечения функционирования которых необходима доставка ЗИП, каждому из них нужно присвоить порядковый номер i ($i \in [0; N]$, где N – число элементов оборудования). На рис. 1 в качестве примера представлен условный массив элементов ОПС с ориентировочными значениями средней наработки на отказ, соответствующий реальным условиям эксплуатации ОПС.

2. Составить массив значений средней наработки на отказ t_i . Если известны значения интенсивностей отказов λ_i , то значения массива t_i могут быть рассчитаны по формуле [4]:

$$t_i = \frac{1}{\lambda_i}.$$

Значения t_i и λ_i приводятся в документации по расчёту надёжности элементов или их техническим условиям, или могут быть приняты исходя из анализа статистики приборов-аналогов.

3. Назначить значение шага *Step* план-графика исходя из удобства визуального отображения информации. В рассматриваемом примере расчёт проводится для периода в 50 000 часов и принят шаг в 5000 часов.

4. Составить план-график, имеющий вид таблицы (рис. 1), руководствуясь следующими соображениями:

4.1. В первом столбце перечисляются номера элементов оборудования, а во втором – их наименования. В рассматриваемом примере представлены 6 элементов, включая элемент А.

4.2. Число столбцов N_{col} , за исключением первого и второго (на рис. 1 они не имеют номеров), должно быть кратно шагу *Step*.

4.3. Число строк, за исключением шапки таблицы, равно N .

4.4. В каждой строке необходимо закрасить ячейки, соответствующие моментам отказов элементов исходя из t_i . Например, на рис. 1 элемент А имеет

$t_A = 10\,000$ ч, соответственно закрашены ячейки в 10 000, 20 000, 30 000, 40 000, 50 000 часов.

4.5. Повторить подпункт 4.4 для каждого элемента i .

5. Найти элемент, имеющий минимальное значение t_{\min} :

$$t_{\min} = \min(t_1, \dots, t_N).$$

В рассматриваемом примере такими элементами выступают элемент 4 и элемент А, соответственно $t_{\min} = 10\,000$ ч.

6. Выполнить группировку по столбцам на равные промежутки, в каждый из которых один раз попадают элементы, найденные в п. 5 (в рассматриваемом примере выделены 5 групп, каждая из которых включает в себя по одному отказу элемента 4 и элемента А).

7. Число выделенных в п. 6 групп соответствует числу экспедиций $N_{\text{эксн}}$ ТГК/ПТК на ОПС с целью доставки ЗИП. В рассматриваемом примере получено $N_{\text{эксн}} = 5$ за период в 50 000 часов.

8. Для каждого элемента рассчитать массу ЗИП, доставляемую за одну экспедицию, по формуле:

$$\bar{m}_i = \frac{M_{\text{эп.ЗИП}}}{N_{\text{эксн}}},$$

где $M_{\text{эп.ЗИП}}$ – масса ЗИП, доставляемая на ОПС за рассматриваемый период времени, кг.

9. Рассчитать суммарную массу ЗИП, которая должна быть доставлена каждой экспедицией ТГК/ПТК, по формуле:

$$m_{\text{эксн } j} = \sum \bar{m}_i, \quad j \in [1; N_{\text{эксн}}].$$

Примечание: компоненты суммы \bar{m}_i должны соответствовать закрашенным ячейкам, попавшим в группу столбцов для той или иной экспедиции.

Обсуждение результатов и перспектив

Предлагаемая методика планирования доставки ЗИП на ОПС направлена на повышение эффективности транспортной системы путём оптимизации грузопотока.

При планировании доставки ЗИП должен быть учтён тот момент, что отсек ТГК/ПТК имеет ограничения по габаритным размерам и объёму доставляемых на ОПС грузов. В контексте методики вопрос, связанный с объёмами комплектов ЗИП, не был рассмотрен, так как основным критерием выступает надёжность. Так или иначе, для учёта объёмных ограничений могут быть применены дополнительные математические методы (например, метод R-функций).

Следует отметить, что предлагаемый вариант анализа план-графика по минимальной средней наработке на отказ не является единственным. В частности, если необходимо оптимизировать массу ЗИП, доставляемую ТГК/ПТК на ОПС, могут быть применены различные математические методы (метод кластеризации, метод анализа иерархий и т.д.) [5]. Тем не менее, предлагаемый подход отличается наглядностью и простой пошаговой реализацией, которая может быть автоматизирована при помощи программного обеспечения. Также следует отметить, что в данной методике могут быть учтены дополнительные факторы, в том числе особенности планирования грузопотока с учётом возможности возникновения НШС, связанных с транспортным кораблём на разных этапах его жизненного цикла.

Заключение

В статье представлена методика планирования доставки ЗИП на ОПС с учётом факторов надёжности. Преимуществом усовершенствованной методики является упрощение процесса планирования транспортных операций без применения методов математического программирования.

Библиографический список

1. Бидеев А.Г., Карбовничий В.П., Майоров И.В., Новиков А.Л., Скобелев П.О., Сычева М.В. Метод адаптивного планирования грузопотока в интерактивной мультиагентной системе расчёта программы полёта, грузопотока и ресурсов российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2014. № 1 (4). С. 29-38.
2. Беляев М.Ю., Карасев Д.В., Матвеева Т.В., Рулев Д.Н. Грузовые корабли «Прогресс» в программах орбитальных станций (к 40-летию первого в мире полёта грузового корабля к орбитальной станции) // Космическая техника и технологии. 2018. № 1 (20). С. 23-39.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
4. Куренков В.И., Капитонов В.А. Методы расчёта и обеспечения надёжности ракетно-космических комплексов: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. 320 с.
5. Надёжность и эффективность в технике: справочник в 10 т. Т. 2. Математические методы в теории надёжности и эффективности / под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.

METHODOLOGY OF DELIVERING SPACE PARTS, TOOLS AND ACCESSORIES TO A NEAR EARTH ORBITAL STATION ON THE BASIS OF THE RELIABILITY FACTOR

© 2023

- I. V. Zheleznov** Postgraduate Student of the Department of Space Engineering named after General Designer D.I. Kozlov;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
Engineer;
S.P. Korolyov Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolyov, Moscow Region, Russian Federation;
zheleznov.ilia2016@yandex.ru
- R. A. Uperchuk** Postgraduate Student of the Department of Space Engineering named after General Designer D.I. Kozlov;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
Engineer;
S.P. Korolyov Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolyov, Moscow Region, Russian Federation;
uperchuk.roman@yandex.ru
- V. K. Eroshenko** Engineer;
S.P. Korolyov Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolyov, Moscow Region, Russian Federation;
post@rsce.ru

The main aspects of the deployment of multi-module orbital manned stations are considered. The methodology for planning the delivery of spare parts, tools and accessories used in planning of transport operations to the International Space Station, is analyzed. It is shown that its application is related to the problem of mathematical programming with a large number of variables, which complicates the process of finding the optimal planning option in terms of economic efficiency. Transport operations to national manned orbital stations are carried out less frequently as compared to the International Space Station due to the enormous costs of spacecraft launches taking into account possible emergency situations. An approach to improving the methodology for planning the delivery of spare parts, tools and accessories for possible use on national manned orbital stations is proposed. It consists in taking into account the reliability of on-board equipment. The advantage of the improved methodology is simplification of planning transport operations without the use of mathematical programming. In addition, the improved methodology is clear, simple and can be implemented step by step.

Orbital manned station; transport system; reliability factor; emergency situation; spare parts tools and accessories; mean time to failure

Citation: Zheleznov I.V., Uperchuk R.A., Eroshenko V.K. Methodology of delivering space parts, tools and accessories to a near Earth orbital station on the basis of the reliability factor. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 71-77. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-71-77

References

1. Bideev A.G., Karbovnichy V.P., Mayorov I.V., Novikov A.L., Skobelev P.O., Sycheva M.V. The method of adaptive cargo traffic planning in the interactive multi-agent system for calculating the mission plan, cargo traffic and resources of the Russian segment of the International Space Station. *Space Engineering and Technology*. 2014. No. 1 (4). P. 29-38. (In Russ.)
2. Belyaev M.Yu., Karasev D.V., Matveeva T.V., Rulev D.N. Progress cargo vehicles in orbital-station programs (dedicated to the 40th anniversary of the world's first cargo vehicle space light to an orbital station). *Space Engineering and Technology*. 2018. No. 1 (20). P. 23-39. (In Russ.)
3. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Basics of the theory of reliability]. SPb.: BKhV-Peterburg Publ., 2006. 704 p.
4. Kurenkov V.I., Kapitonov V.A. *Metody rascheta i obespecheniya nadezhnosti raketno-kosmicheskikh kompleksov: ucheb. posobie* [Methods of calculating and ensuring spacecraft reliability]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2007. 320 p.
5. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik v 10 t. T. 2. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti i effektivnosti / pod red. B.V. Gnedenko* [Reliability and efficiency in engineering. Handbook in 10 volumes / ed. by B.V. Gnedenko]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 280 p.