

Особенности восстановления систем наземного оборудования ракетно-космического комплекса

Т.А. Мусабаяев, А.В. Рождественский, И.А. Милуков

Аннотация:

В статье рассмотрены особенности подхода к восстановлению и обеспечению функционирования оборудования специальных технологических систем стартового комплекса. Определены основные показатели надежности технологических систем различных типов. Представлены зависимости, описывающие состояние системы от состояния ее отдельных элементов и позволяющие обосновать сроки и объемы поставки запасных элементов системы для обеспечения ее дальнейшего функционирования.

Ключевые слова:

технологическое оборудование стартового комплекса; специальные технические системы; показатели надежности функционирования системы; восстановление лучшей работоспособности.

Технологическое оборудование (ТхО) — это составная часть стартовых комплексов (СК), предназначенная для проведения всех видов работ с ракетой космического назначения (РКН) и ее составными частями.

Специальные технические системы (СТС) предназначены для создания и поддержания условий для нормального функционирования РКН, технологического и другого оборудования в процессе эксплуатации СК.

В отличие от ТхО СК, для которых характерна цикличность функционирования с контролем технического состояния оборудования перед применением по назначению, можно выделить три типа СТС в зависимости от режимов функционирования.

1. СТС с режимом циклического функционирования совместно с технологическим оборудованием СК - системы оборотного водоснабжения, электроснабжения и другие.

2. СТС с режимом циклического функционирования с многократным включением и режим непрерывного функционирования - системы электропитания, вентиляции и кондиционирования, теплоснабжения, водоснабжения и другие.

3. СТС с режимом непрерывного дежурства - системы газового и водяного пожаротушения.

Анализ структуры, состава и эксплуатационных свойств оборудования СТС позволяет выделить следующие особенности СТС, отличающие их от ТхО СК: подчиненность функционирования технологическим системам и требованиям к безопасности; разная интенсивность режима функционирования различных СТС; разветвленность и повторяемость структуры СТС; преобладание массового (общепромышленного) оборудования; однородность и взаимозаменяемость элементов различных СТС; высокая ремонтпригодность систем, малое число базовых элементов; низкая цена отказа для ряда элементов СТС.

Выявленные отличия показывают необходимость разработки специальных подходов к расчету необходимого количества запасных элементов.

Обычно проектирование системы обеспечения запасами (СОЗ) СТС проводилось с использованием таких же подходов, как и для ТхО СК. Эти подходы имеют следующие недостатки.

1. Не позволяют использовать возможность создания групповых комплектов запасных элементов одного типа для различного оборудования СТС.

2. Не учитывают более раннее старение оборудования СТС и соответственно рост интенсивности отказов.

3. При формировании комплектов запасных частей не позволяют учесть гибкую систему ремонта и возможность выбора между поэлементным и агрегатным ремонтом оборудования.

4. Не ориентированы на постепенные отказы, то есть не позволяют корректировать количественный состав запасных элементов в зависимости от изменения технического состояния оборудования СТС.

В теории управления запасами разработаны подходы, которые позволяют выбрать количество элементов заданной номенклатуры из условия минимума издержек, либо максимума прибыли, или вероятности обеспечения запасами при одном или двух ограничениях. Рассмотрим особенности задачи обеспечения запасами СТС и возможность применения имеющихся подходов для ее решения.

Так как в восстанавливаемых системах с высокой ремонтпригодностью надежность функционирования в значительной степени определяется системой ремонта и

уровнем обеспеченности запасными элементами, то объем запасов влияет не только на издержки функционирования СОЗ, но и на стоимость эксплуатации СТС. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что показателем качества СОЗ следует принять затраты на эксплуатацию СК, обусловленные функционированием СОЗ СТС.

Рассмотрим ограничения на показатели надежности функционирования СТС. Для систем первого типа таким ограничением будет ограничение на вероятность выполнения задачи применения по назначению, и оно определяется исходя из требований к соответствующему технологическому оборудованию. Надежность систем второго типа характеризуется коэффициентом готовности. Для систем третьего типа надежность определяется коэффициентом оперативной готовности. Таким образом, в качестве ограничений для СТС СК выступают показатели надежности трех видов:

$P_{Вз}$ - вероятность выполнения задачи применения по назначению;

$K_{ог}$ - коэффициент оперативной готовности;

$K_{г}$ - коэффициент готовности.

Так как системы, участвующие в обеспечении подготовки и пуска РКН, независимы в смысле надежности, то $P_{Вз}$ для СТС первого типа будет представлять произведение их вероятностей выполнения задачи.

Технические системы второго и третьего типа, обеспечивающие безопасность эксплуатации, расположены в разных сооружениях, поэтому они независимы по территориальному и функциональному признакам. При отказе любой из систем снижается безопасность проведения работ в случае возникновения нештатной ситуации, но это не препятствует выполнению целевой задачи СК. Следовательно, требования к каждой из этих систем следует рассматривать отдельно. В связи с этим необходимо сформировать вектор ограничений на показатели надежности СТС СК - $P^{ДОП}$. Для совокупности СТС СК, включающей J систем, из которых L систем относятся к первому типу, а M ко второму, размерность вектора ограничений $I = J - L + 1$. С учетом сказанного, вектор ограничений на показатели надежности запишется в виде

$$P^{ДОП} = \left(\prod_{j=1}^L P_{Взj}^{ДОП}, K_{ГL+1}^{ДОП}, \dots, K_{Гm+1}^{ДОП}, K_{ОГm+L+1}^{ДОП}, \dots, K_{ОГj}^{ДОП} \right) \quad (1)$$

где: $P_{Взj}^{ДОП}$ — требуемая вероятность выполнения задачи,

$K_{Гj}^{ДОП}$ — требуемый коэффициент готовности СТС,

$K_{ОГj}^{ДОП}$ — требуемый коэффициент оперативной готовности.

Отмеченные особенности задачи обеспечения запасными элементами СТС СК не позволяют использовать известные существующие подходы и требуют разработки новой постановки задачи.

При постановке задачи для описания взаимосвязи места расположения элемента в системе и его типа сформируем трехмерное множество всех элементов комплекса систем $M_{NJK} = \parallel m_{ijk} \parallel$ размерности N, J, K , где N — количество типов элементов СТС, J — количество систем СТС СК, K — шах ($Kj, j = 1, \dots, J$), Kj — количество элементов в системах. Элементы множества принимают значение 1 при наличии элемента с соответствующим индексом в системе и 0 при отсутствии такового.

Введем множества, характеризующие процесс эксплуатации СТС СК:

- множество Str подмножеств $Str j$, задающих структуру СТС в виде элементов и связей между ними в смысле надежности;

- множество $M\%$ — задающее перспективный план запусков в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_k ;

- вектор допустимых значений показателей надежности функционирования СТС $P^{доп}$;

- множество $R^{СТС}$ подмножеств $R^{СТС}_{jk}$, содержащее значения определяющих параметров элементов СТС, полученных в результате измерений в текущий и предшествующие периоды эксплуатации, т.е. априорные и апостериорные данные об индивидуальном техническом состоянии элементов СТС СК;

- множество $V^{ЗИП}$ запасных элементов.

Зададим ряд вспомогательных множеств и величин:

Sj — вектор состояния j -й системы, который задается состоянием элементов системы.

Состояние элемента задается следующим образом:

$Sjn = 1$, если элемент работоспособен,

$Sjn = 0$, если элемент неработоспособен;

V_j^K — K — мерное множество всех возможных состояний для j -ой системы;

Φ — структурная функция j -ой системы, заданная соотношением:

$\Phi = 1$, если система в состоянии Sj , работоспособна,

$\Phi = 0$, если система в состоянии Sj , неработоспособна;

P^0_{jk} — вероятность нахождения k -го элемента j -ой системы в состоянии $s_{ijk} = 1$ в момент времени t (при значениях определяющего параметра R_{jk} без учета возможности замены его на запасной элемент;

$P_i^{ЗИП}$ — вероятность обеспечения запасными элементами i -го типа в момент времени t при запасе элемента i -го типа $V_i^{ЗАП}$;

$P_{ij}^{ВОССТ}$ — вероятность восстановления работоспособности элемента i -го типа j -ой системы за допустимый промежуток времени, позволяющий избежать перехода системы в состояние отказа.

Тогда вероятность безотказной работы i -ой системы в момент времени t :

$$P_i(t) = \sum_{s_i \in V^{kj}} (\Phi_i \times \prod_{k=1}^K P_{i,k}(t)^{S_{j,k}} (1 - P_{i,k}(t))^{1-S_{j,k}}). \quad (2)$$

Вероятность безотказной работы k -го элемента i -ой системы с учетом восстановления при отказах

$$P_{it}(t) = P_{i,k}^0(r_{i,k}, t) + (1 - P_{i,k}^0(r_{i,k}, t)) \cdot P_{i,k}^{ЗИП} \cdot P_{i,k}^{ВОССТ}, \quad (3)$$

Здесь $P_{ВЗj}$ — вероятность выполнения задачи для систем СТС, участвующих в технологическом цикле подготовки и пуска РКН, $j = 1 \dots L$.

Применяя введенные обозначения, сформулируем задачу обоснования объема и сроков поставки запасных элементов СТС СК следующим образом:

Дано: $Str^{СТС}$, M_K , $P_o^{ДОП}$, $R^{СТС}$.

Найти: $\pi = \operatorname{argmin}_{\pi} \frac{C(\pi)}{L(\pi, T)}$,

где: $\pi = (V_1^{ЗИП}, V_2^{ЗИП}, \dots, V_N^{ЗИП}, T)^T$;

$C(\pi)$ — функция затрат, отражающая вклад СОЗ СТС в стоимость эксплуатации СК;

$L(M_K, T)$ — количество планируемых пусков за период T .

Задача в описанной постановке учитывает особенности СТС СК как объекта эксплуатации. Для решения данной задачи применялся метод покоординатного спуска, позволяющий найти целочисленные квазиоптимальные решения.

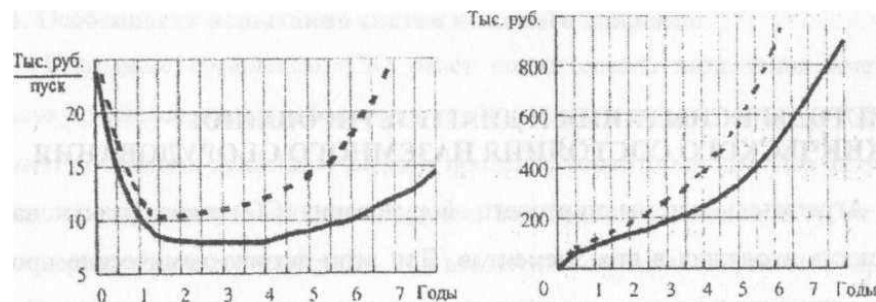


Рисунок 1- Зависимости удельной стоимости и единовременных затрат на закупку запасных элементов СТС от срока их поставки.

Численное решение задачи в приведенной постановке проведено для СК «ПРОТОН». По результатам расчетов на рисунке 1 приведены зависимости удельной стоимости эксплуатации СК и единовременных затрат на закупку запасных элементов СТС от срока их поставки.

Библиографический список

1. Мусабаев Т.А., Калинин С.Ю. Системы контроля и эксплуатации ракетно-космических комплексов. – М.: «МАТИ» – РГТУ им. Циолковского, 2002. – 186 с.: илл.
2. Бармин И.В., Прохорович В.Е., Миронов А.Н. Стратегия эксплуатации стартовых комплексов космического назначения за пределами назначенного ресурса // Полет, 2000, №4. с. 22-27.
3. Афанасьев В.Г., Зеленцов В.А., Миронов А.Н. Методы анализа надежности и критичности отказов сложных систем. М.О. РФ, 1992. 99 с.
4. Недайвода А.К. технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники. – М.: Машиностроение, 1998 – 240 с.

Сведения об авторах

Мусабаев Талгат Амангельдиевич, Председатель национального космического агентства Республики Казахстан, д.т.н., профессор, e-mail:rassiec@mail.ru

Рождественский Александр Викторович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.э.н.,
e-mail:info@itbu.ru

Милюков Игорь Александрович, доцент Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, к.т.н., e-mail:rassiec@mail.ru