

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВАНИИ ОЦЕНКИ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Е.В. Юркевич

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: yurk@ipu.ru

Л.Н. Крюкова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: lidkryukova@ipu.ru

Ключевые слова: живучесть космического аппарата, срок активного существования, бортовая аппаратура, функциональные элементы, техническое состояние, характеристики информационных связей, структурная надежность, функциональная надежность, информационное взаимодействие элементов аппаратуры.

Аннотация: Предлагаются механизмы, позволяющие совершенствовать технологии обеспечения живучести космических аппаратов при увеличении срока их активного существования и с расширением заданий орбитального полета. В отличие от традиционного построения структурной схемы оценки надежности бортовой аппаратуры предложены механизмы, позволяющие учитывать живучесть космического аппарата, исходя из оценки характеристик взаимосвязей между функциональными элементами. Методологической особенностью предлагаемого подхода является формулировка принципов информационного взаимодействия элементов бортовой аппаратуры. В связи с неопределенностью факторов, влияющих на агрессивность среды, в качестве исходных данных для оценки надежности предлагается использовать наработки по однотипным космическим аппаратам.

1. Введение

Обеспечение соответствия характеристик бортовой аппаратуры (БА) возрастающим требованиям к функциональным возможностям космических аппаратов (КА) является одной из приоритетных задач в создании средств освоения космического пространства. С целью оптимизации управления бортовыми программно-техническими средствами предлагается рассмотреть методологические возможности оценки полноты выполнения ими заданных функций.

Технологически оценка пригодности КА к выполнению расширенного полетного задания осложняется тем, что сроки активного существования (САС) КА возросли с 5 до 10–15 лет. При этом важным ограничением является работа в среде, агрессивность которой является следствием воздействия факторов неизвестного происхождения.

С целью повышения точности оценок надежности БА как сложной системы в данной работе предлагается выделять структурную и функциональную составляющие [1]. В структурной предлагается учитывать вероятность безотказной работы (ВБР) элементов БА и надежность физической реализации их взаимосвязей. В функциональной предлагается оценивать вероятность штатного выполнения системы технологических операций во время орбитального полета.

2. Принципы оценки структурной надежности блоков БА

В процессе орбитального полета надежность КА может изменяться даже без совершения какой-либо работы. Поэтому в качестве базовых предпосылок предлагается строить систему функциональных блоков в виде ансамбля элементов с учетом следующих принципов [2]:

1) *Принцип соответствия системы функциональных блоков БА структуре алгоритма выполнения полетного задания.* Алгоритм работы функциональных блоков (далее – блоков) БА в реализации технологического процесса согласно полетному заданию рассматривается нами как совокупность операций. В этом случае процесс выполнения полетного задания в целом можно представить системой операций, элементы которой связаны между собой. Алгоритм оценки структурной надежности системы блоков должен быть адекватен алгоритму оценки эффективности выполнения заданной системы операций.

2) *Принцип выделения иерархических уровней в оценке структурной надежности системы блоков согласно архитектуре построения БА.* Корректность оценок структурной надежности системы блоков (согласно иерархическим уровням архитектуры БА) должна соответствовать иерархии важности операций выполнения полетного задания для технологических процессов соответствующего уровня.

Следствиями этого принципа являются теоремы:

Теорема 1. *Если в полетном задании технологический процесс j -го уровня иерархии определен, но выполняется с помощью m несовместных операций $j+1$ -го уровня иерархии, описываемого параметрами a_{j+1}^k таких, что $a_{j+1}^k = f(a_{j+1}^1, \dots, a_{j+1}^m)$, вероятность штатного выполнения технологического процесса j -го уровня не зависит от характера связей между операциями на $j+1$ уровне иерархии и определяется выражением $P_k^{(j)} = \prod_{k=1}^m P_k^{(j+1)}$, где $P_k^{(j+1)}$ — вероятность штатного выполнения k -й операции $j+1$ уровня иерархии. Эта формула справедлива как для зависимых, так и для независимых операций предыдущего уровня, участвующих в выполнении данного полетного задания при условии их несовместности.*

Доказательство справедливости этой теоремы основывается на принципе двойственности операций сложения и умножения несовместных событий.

Теорема 2. *Распараллеливание операций j -го уровня иерархии не приводит к уменьшению количества составных процессов $j+1$ -го уровня, так как в противном случае это привело бы к нарушению алгоритма выполнения данного полетного задания. Более того, для распараллеливания нужны дополнительные (служебные) действия. Из этих утверждений следует: вероятность штатного выполнения распараллеленного процесса не может быть выше вероятности штатного выполнения исходного, т. е. $P_{расп}^{(j)} \leq P^{(j)}$.*

3) *Принцип выделения в системе функциональных блоков БА иерархически упорядоченных множеств модулей.* Под термином «модуль» будем рассматривать программно-технические средства определенного функционального назначения.

Примем, что в каждом функциональном блоке БА содержится конечное множество модулей (R_M). В этом случае функциональную структуру БА можно представить в виде алгоритма реализации технологического процесса выполнения полетного задания. Средствами реализации такого процесса является совокупность множеств модулей S_n , ($n = 1, 2, \dots, N$), объединенных в систему согласно функциональной структуре БА. Причем, $S_n \leq R_M$, так как из одного и того же множества модулей может быть (согласно заданному алгоритму функциональной структуры) сформирован набор различных множеств S_1, S_2, \dots, S_N . Связи между этими множествами также определяются алгоритмом функциональной структуры, определенным полетным заданием. Согласно данному принципу при расчете надежности БА следует учитывать, что:

- один и тот же модуль может включаться в несколько множеств S_n , т. е. несколько раз может привлекаться для выполнения одной операции;
- не все модули функционального блока содержатся во множествах S_n данной функциональной структуры, следовательно, они могут не участвовать в конкретном технологическом процессе;
- вероятность штатного выполнения технологического процесса соответствует вероятности штатного выполнения работ его функциональной структуры;
- функциональная структура процесса выполнения полетного задания формируется с помощью множества модулей

$$R_M = \bigcup_{j=1}^J \left(\prod_{n=1}^N S_n \right),$$

где: $j = 1, 2, \dots, J$ – индекс уровня иерархии операций технологического процесса; $n = 1, 2, \dots, N$ – индекс множеств модулей, реализующих технологический процесс выполнения полетного задания; $A = const$ количество уровней в иерархии операций технологического процесса, определенное требованием к структурной надежности системы функциональных блоков алгоритма выполнения полетного задания (первый принцип); $J \leq A$.

4) *Принцип совмещения пространства состояний и пространства событий реализации полетного задания.* Под пространством состояний в данной работе понимается конечное множество результатов последовательных или последовательно-параллельных операций, выполняемых модулем в процессе реализации конкретного процесса. Под пространством событий понимается конечное множество результатов выполнения операций, характеризуемых наличием или отсутствием сбоев. В нашем рассмотрении количество событий всегда равно количеству операций независимо от детализации представления результатов полетного задания.

3. Особенности механизма оценки живучести БА

Надежность выполнения полетного задания во многом определяется характеристиками уникальных средств, входящих в состав функциональных модулей. Поэтому требуется учитывать особенности оценки их технического состояния для каждой модификации спутников отдельно. В данной работе достижение соответствия такой оценки положениям Технического задания предлагается рассматривать как постановку обратной задачи расчета надежности БА для формирования рекомендаций по введению конструктивных доработок, обеспечивающих требуемую живучесть КА.

В качестве первой особенности решения этой задачи выделим неопределенность влияния внешних факторов на КА во время полета. Второй особенностью является

уникальность характеристик программно-технических средств БА. При испытаниях аналогов функциональных блоков, установленных на КА, часто наблюдается неопределенность значений их характеристик из-за отступлений от требуемой технологии во время производства, хранения или транспортировки. В данной работе под неопределенностью предлагается понимать характеристику ситуации, в которой оценки технического состояния программно-технического средства описываются случайными процессами. Введение таких неопределенностей при оценке технического состояния БА определило использование методов стохастического программирования.

Практика показывает, что традиционные методы прогнозирования надежности работают, если процесс изменения технического состояния функциональных блоков стационарен или его характеристики слабо изменяются во времени. В данной работе, для того чтобы учитывать возможность резких изменений в реакциях БА на внешние воздействия, реализацию технологических операций предлагается оценивать с помощью модели Марковского процесса с доходами (МПД) [3]. Такой подход предполагает расчет ВБР БА при ее фиксированном техническом состоянии и оценку дохода (т. е. изменение ВБР) при наступлении каждого события, в нашем случае это проведение технологической операции.

В целом, живучесть БА предлагается оценивать показателями динамики работоспособности ее блоков (оценка их функциональной надежности), а также надежности взаимодействия этих блоков в процессе орбитального полета. На основании мониторинга технического состояния БА, как результата выполнения конкретной технологической операции оценивается динамика ВБР при переходе функциональных блоков из одного подмножества состояний в другое. Для этого предлагается использовать агрегированные показатели надежности: среднее время до попадания в заданное подмножество состояний; среднее число переходов из i -го состояния в j -е до попадания в заданное подмножество; среднее число переходов на интервале времени $(0, T)$ до попадания в заданное подмножество; вероятность перехода из подмножества состояний $\{Si\}$ в подмножество состояний $\{Sr\}$ на интервале $(0, T)$; среднее суммарное время пребывания БА в заданном подмножестве состояний; вероятность пребывания БА в момент T в подмножестве состояний $\{Si\}$.

Конструктивные решения функциональных блоков рассматриваются как уникальные, поэтому для оценки эффективности их применения в решении широкого класса задач предлагается ориентироваться на математическое ожидание ВБР при ограничениях в виде оценки их технического состояния [4]. Такой приближенный метод основан на допущении, что БА работает некоторое случайное время (τ) , имеющее функцию распределения $F(\tau)$, с математическим ожиданием T . В этом случае оценки показателей получаются усреднением оценок для каждого момента времени $\tau \in [0, \infty]$:

$$M(\hat{T}) = \int_0^{\infty} M(\tau) dF(\tau)$$

Для оценки показателей технического состояния БА ожидаемую эффективность (E) предлагается определять с помощью выражения

$$E = M\{\Phi(x(t))\}$$

где $M\{\cdot\}$ – символ математического ожидания; $x(t)$ процесс перехода БА в пространстве состояний; $\Phi(\cdot)$ – функционал интегрального типа, заданный согласно оценке технического состояния БА, определяющий вид показателя надежности, т. е. в нашем понимании дохода. Обозначим доход: w_{ii} , если в момент t состояние процесса $x(t) = x(i)$ (БА в i -м техническом состоянии), и w_{ij} , если t – момент перехода процесса из i -го состояния в j -е ($i \neq j$). Теперь выражение для МПД запишется:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_{ij} M_j(t) + \omega_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_{ij} \omega_{ij}; M_i(t) = 0.$$

С учетом интегрального представления функционалом $\Phi(\cdot)$ надежностные показатели предлагается записывать через интеграл Стильтьеса в виде:

$$E = M \left\{ \int_0^T d\Phi(x(t)) \right\},$$

где $d\Phi(x(t))$ – дифференциал интегрирующей функции.

Таким образом, формируется множество альтернативных решений, для поддержки которого предлагается технология *OLAP* – оперативный комплексный многомерный анализ данных о техническом состоянии БА. Эта технология базируется на тесте *FASMI* – быстром анализе разделяемой многомерной информации, с помощью которого, используя аппарат нечеткой логики и теорию возможностей, предлагается механизм многомерного анализа данных [5].

В целом, с помощью стохастического программирования предлагается оценивать техническое состояние уникальных блоков БА на основании результатов мониторинга динамики их характеристик.

4. Выводы

Предлагаемые положения применимы для рекомендаций конструктивных доработок нерезервируемых, резервируемых, невозстанавливаемых, восстанавливаемых модулей БА. Они допускают возможность оценки эффективности работы БА, элементы которой могут иметь отказы нескольких типов, а также позволяют исследовать влияние на надежность БА таких факторов проектирования как способы и степень резервирования, а также восстановления и контроля.

Список литературы

1. Юркевич Е.В. Введение в теорию информационных систем. М.: ИД «Технологии», 2007. 273 с.
2. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / Ульяновск: Печатный двор, 2012. 216 с.
3. Волков Ю.В., Соболев А.В. Пример применения марковского процесса с доходами при принятии инженерных решений в отношении объектов ядерных технологий в условиях неопределенности // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2007. № 3-1. С. 16-22
4. Кривопалов Д.М., Юркевич Е.В. Матричная форма функций вероятностей безотказной работы систем с ненагруженным резервированием // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 20-25.
5. Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T. Providing OLAP (On-line Analytical Processing) to User-Analysts: An IT Mandate // Codd & Date, Inc, 1993. Retrieved on 2008-12-11.