

УДК 629.7

# МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ СТРОГОСТИ ОЦЕНОК НАДЕЖНОСТИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО ВЫБОРА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ СБОЕВ И ОТКАЗОВ

**О.В. Казанцева**

*АО «Корпорация «ВНИИЭМ»*

Россия, 107078, Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1

E-mail: [masqcat@gmail.com](mailto:masqcat@gmail.com)

**Д.М. Кривопапов**

*АО «Корпорация «ВНИИЭМ»*

Россия, 107078, Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1

E-mail: [persival92@rambler.ru](mailto:persival92@rambler.ru)

**Ключевые слова:** закон распределения, алгоритм определения аналитического выражения, повышение точности оценки и прогнозирования надежности, космических аппаратов.

**Аннотация:** С целью оценки надежности различных схем резервирования программно-технических средств структурными методами рассмотрены математические модели, определяемые законами распределения характеристик надежности элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов. Показана важность корректности представления закона распределения времени до отказа космических аппаратов. Поставлена задача разработки алгоритма нахождения в аналитическом виде функции распределения времени до отказа космических аппаратов. Показана схема возможной реализации закона распределения при разработке алгоритма создания программного обеспечения. Предлагаемый алгоритм позволит повысить точность оценок вероятности безотказной работы и прогнозирования надежности космических аппаратов.

## 1. Введение

Одной из центральных проблем в построении систем управления сложными программно-техническими комплексами является оценка надежности работы динамических объектов при условиях неопределенности. Сегодня обеспечение соответствия возможностей бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА) возрастающим требованиям к управлению в хозяйственном комплексе страны является одной из приоритетных задач.

Обеспечение функциональной пригодности КА осложняется тем, что в настоящее время в технических заданиях на их разработку БА повышаются требования по надежности. Например, сроки активного существования (САС) КА возросли с 5 до 10-15 лет.

Следовательно, для выполнения функций, определенных в Техническом задании (ТЗ), необходимо соответствующее повышение качества и надежности БА.

Традиционно расширение функциональных возможностей БА предполагает рост количества элементов, входящих в состав её систем. При этом важным ограничением в работе КА является необходимость выполнять сложные функции в агрессивной среде, при воздействии внешних факторов неизвестного происхождения.

Согласно существующим методам [1] важной составляющей обеспечения выполнимости полетных заданий КА является количественная оценка его показателей надежности (ПН), в части таких характеристик как:

- вероятность безотказной работы за срок САС;
- средняя наработка до отказа;
- гамма-процентная наработка до отказа;
- интенсивность отказов элементов;
- и др.

Методы расчета, применяемые в настоящее время в процессе проектирования программно-технических средств, удовлетворяют практическим требованиям при оценке надежности элементов БА. Однако их строгость часто не достаточна для оценки безотказности КА в целом. Поэтому в данной работе предлагается использовать системный подход, основанный на применении структурных методов расчета показателей надежности.

## **2. Механизм обеспечения строгости оценок надежности КА**

В данной работе оценки надежности КА предлагается базировать на представлении БА в виде сложной программно-технической системы. Существенной особенностью предлагаемого подхода является использование принципа адаптации системы оценки изменений параметров и структуры работы системы управления (СУ) к результатам наблюдения и обработки текущей информации, чтобы используемая система контроля улучшала свое функционирование, достигая в конечном итоге оптимального состояния.

Практика математического моделирования показывает существенную зависимость точности оценок надежности КА от строгости оценки сложности структурных схем надежности БА, а также от корректности выбора применяемых законов распределения характеристик надежности элементов, и достоверности исходных данных для таких оценок. Например, в системах управления КА часто неточность априорной информации компенсируется целенаправленностью обработки текущих результатов мониторинга работы БС.

Расчет вероятности безотказной работы (ВБР) БС существующими методами в общем случае предполагает составление структурной схемы надежности (ССН) элементов КА с учетом логико-функциональных связей и взаимодействия между этими элементами, а также видов и способов резервирования и других факторов [1]. Сложность структурных схем надежности, применяемые законы распределения характеристик надежности элементов и достоверность исходных данных определяют математические модели, используемые для описания надежности КА.

Часто при проведении расчетов структурными методами делается допущение об экспоненциальности законов распределения характеристик надежности всех элементов ССН КА. Такое упрощение математической модели может привести к серьезным ошибкам при анализе и прогнозировании надежности уже на уровне элементов БА. При оценке надежности КА в целом применение математической модели в таком виде

ведет к накоплению ошибки в виде занижения результатов расчета безотказности на раннем этапе оценки и завышения результатов расчета при долгосрочной оценке.

Экспоненциальное распределение адекватно отражает оценку времени до отказа дискретного элемента или системы из последовательно подключенных элементов. Однако ССН, содержащие непоследовательные соединения элементов, уже не обладают экспоненциальными распределениями, в результате чего возникает необходимость определения корректного закона распределения.

Результаты исследований, проведенных в работе [2], показывают, что вероятность безотказной работы устройств подчиняется:

- гиперэкспоненциальному распределению при нагруженном резервировании элементов;
- обобщенному гамма распределению при ненагруженном или смешанном резервировании элементов.

Для получения аналитического выражения закона распределения любую функцию распределения случайной величины можно разложить в ряды экспонент. Пример такого разложения описан в работе [3], где показано разложение в ряд экспонент закона распределения времени до отказа элементов, подключенных по схеме ненагруженного резервирования. Функция ВБР от времени  $P(t)$  в этом случае представляется в виде:

$$P(t) = A(t) \cdot e^{-at} + B(t) \cdot e^{-bt} + C(t) \cdot e^{-ct} + \dots,$$

где:

$$A(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + \dots$$

$$B(t) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 + \dots$$

....

Значения коэффициентов расчетных моделей могут быть получены путем соответствующих преобразований. Для системы из двух элементов:

$$P_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 t}.$$

$\lambda_1, \lambda_2$  – интенсивности отказов составных элементов, значения которых при расчетах определяются из справочников. Однако эти параметры надежности элементов получены теоретико-вероятностными методами в лабораторных условиях и не могут отражать все факторы, которые элементы БА испытывают в реальных условиях.

Учет всех возможных факторов среды предлагается осуществлять исходя из следующих подходов:

- структура модели формируется на основе теоретических данных;
- значения коэффициентов в составе моделей формируются на основе реальных данных по наработкам однотипных КА.

Таким образом, с целью повышения строгости оценок ВБР КА в данной работе ставится задача получения апостериорной оценки надежности БА. В качестве исходных данных предлагается использовать имеющиеся оценки точности расчетов времени наработки до отказа БА в однотипных КА, функционировавших в схожих условиях.

Будем полагать, что строгость оценок ВБР КА можно повысить с помощью обеспечения корректности выбора закона распределения времени до отказа БА. Такой выбор даст возможность прогнозировать остаточный ресурс исследуемого КА. Важной особенностью реализации предлагаемого подхода является необходимость разработки специализированного программного обеспечения (ПО).

### 3. Методические положения выбора закона распределения времени до отказа БА

Практическую реализацию алгоритма выбора закона распределения предлагается строить в виде двух этапов, графически представленных на рисунках 1-3.

Первый этап предполагает обработку механизма расчета коэффициентов модели БА, т.е. рассматривается модуль 1 с заранее известным законом распределения  $f(x)$ , и модуль 2, который должен определить вид функции закона распределения, заданного в первом модуле. Модуль 2 содержит функции  $U(x)$ , структура которых имеет возможность изменяться, чтобы как можно точнее подстроиться по функцию  $f(x)$  и, в конечном счете, прийти к виду:  $U(x) \approx f(x)$ .

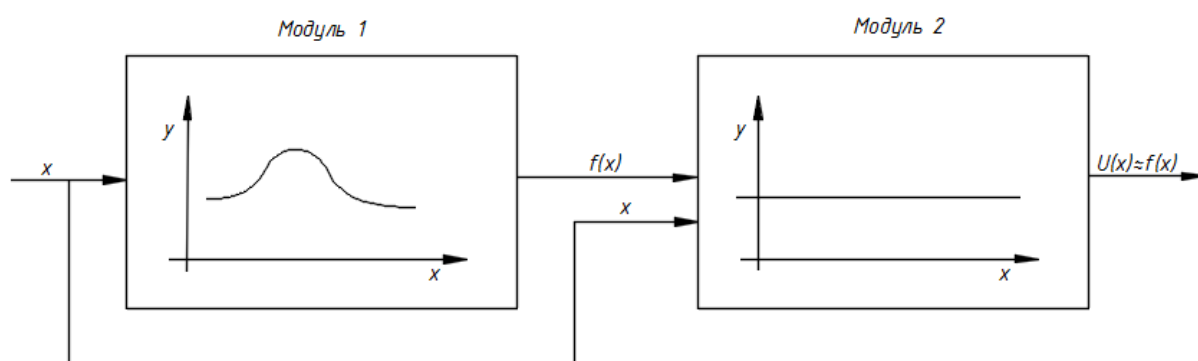


Рис. 1. Схема отработки механизма расчета коэффициентов модели закона распределения случайной величины. Начальный этап.

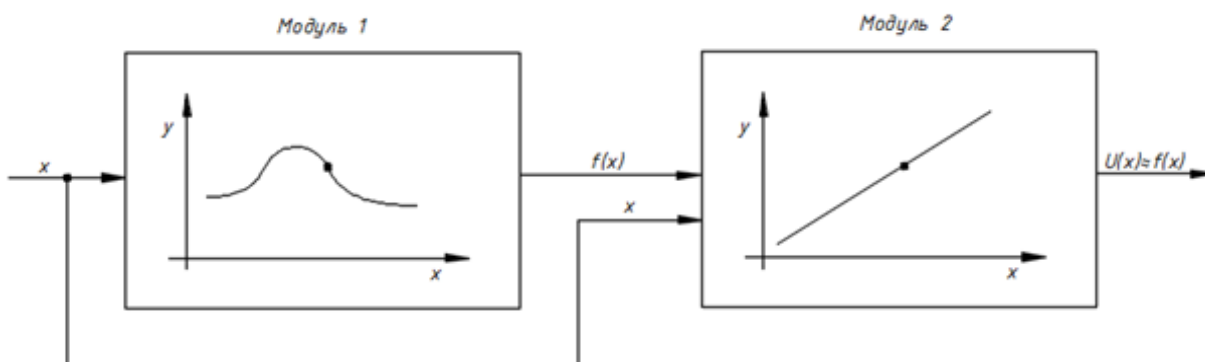
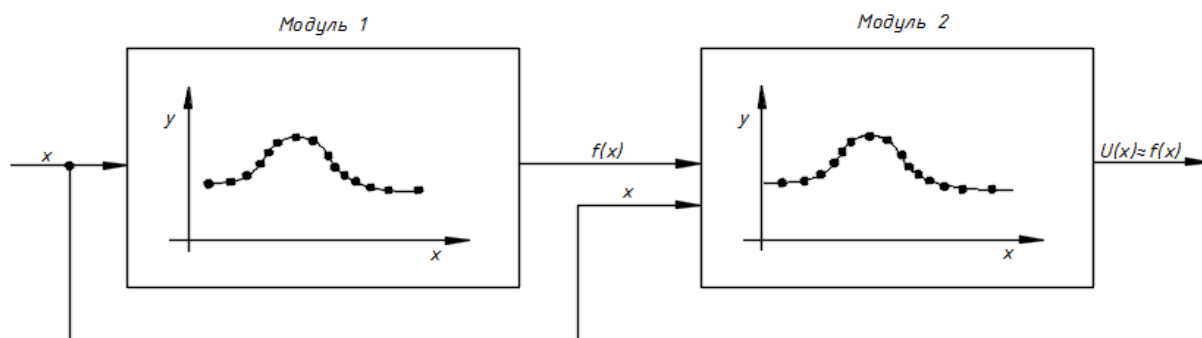


Рис. 2. Схема отработки механизма расчета коэффициентов модели закона распределения случайной величины. Результат одной итерации алгоритма.



**Рис. 3.** Схема отработки механизма расчета коэффициентов модели закона распределения случайной величины. Результат  $n$  итераций алгоритма.

Для реализации поставленной задачи предполагается использовать алгоритмы регрессионного анализа. В отличие от классического случая в предлагаемом подходе вычисляемая функция представляет собой не одну экспоненту, а их композицию:

$$U(x) = A(x) \cdot e^{-ax} + B(x) \cdot e^{-bx} + C(x) \cdot e^{-cx} + \dots$$

Такое представление позволит более точно описывать системы, содержащие резервирование.

На втором этапе обоснования закона распределения случайной величины предполагается применение алгоритмов для формирования  $U(x)$  на реальных данных. В результате возможно получать функцию, которая описывает распределения отказов БА с учетом объективных данных. Это позволяет учесть все процессы, происходящие с элементами систем КА.

В качестве исходных данных предлагается использовать время наработки в виде аргумента ( $x$ ) и апостериорные оценки в виде функции ( $f(x)$ ). Причем под апостериорной оценкой понимаются как безотказные наработки, так и наработки КА на отказ.

## 4. Заключение

Рассмотрена проблема корректности выбора применяемых законов распределения характеристик надежности элементов, входящих в состав БА. Ставится задача получения апостериорной оценки надежности КА с целью повышения точности прогнозирования надежности КА. В качестве исходных данных предлагается использовать имеющиеся наработки по однотипным КА. Для достижения этой цели предлагается подход, с помощью которого повышается корректность вывода закона распределения времени до отказа БА КА по имеющимся данным. Предложена перспективная схема (модель) практической реализации данного подхода методом регрессионного анализа, состоящая из двух этапов. Применение такого механизма позволит существенно повысить точность оценки и прогнозирования количественных характеристик надежности БА КА, что повысит качество и надежность КА в целом.

## Список литературы

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

2. Гуров С.В. Методы и модели анализа надежности сложных технических систем с переменной структурой и произвольными законами распределении случайных параметров, отказов и восстановлении: дис. ... д-ра техн. наук. С. Петербург, 1997.
3. Кривопапов Д.М., Юркевич Е.В. Получение функций ВБР в матричном виде для систем с ненагруженным резервированием при неоднотипных элементах // Вопросы электромеханики. 2017. Т. 5, Вып. 7. С. 11-23.